

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL
POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Control de un glider híbrido con regulación de roll (Kay Juul H)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

Ing. David Eduardo Barrera Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Tomás Salgado Jiménez.

CODIRECTORES

Dr. Luis Govinda García Valdovinos.

Dr. Luciano Nava Balanzar.

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO,
Diciembre 2017



Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **David Eduardo Barrera Hernández**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Control de un glider híbrido con regulación de roll (Kay Juul H)**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Mecatrónica** durante el Examen de Grado correspondiente.


Y para que así conste firmo la presente a los 12 días del mes de diciembre del año dos mil diecisiete.



Dr. Tomás Salgado Jiménez
Directores de Tesis



Dr. Luis Govinda García Valdovinos
Codirector



Dr. Luciano Nava Balanzar
Codirector



Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de la alumno **David Eduardo Barrera Hernández**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Control de un glider híbrido con regulación de roll (Kay Juul H)**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Mecatrónica** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 12 días del mes de diciembre del año dos mil diecisiete.



Dr. Gengis Kanhg Toledo Ramírez

Presidente



Dr. Julio César Solano Vargas

Secretario



Dr. Tomás Salgado Jiménez

Vocal

Resumen

En este trabajo se presenta de manera detallada el proyecto de tesis titulado: *Control de un glider híbrido con regulación de roll (Kay Juul H)*.

Se realiza un previo análisis del estado del arte en vehículos submarinos autónomos en específico de los gliders híbridos, algunos como prototipos industriales y prototipos académicos, Se estudian sus leyes de control y en sus diferentes grados de libertad. En este trabajo se aborda el desarrollo de las ecuaciones del control por modos deslizantes de segundo orden, de hecho la implantación de esta ley para el control en tiempo real para de pitch y roll en un glider es la aportación principal de este tema de tesis.

También se presenta la puesta en marcha e integración de los dispositivos que conforman la arquitectura electrónica de un vehículo diseñado en CIDESI, sus características generales, protocolos y señales de comunicación.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de manera experimental en alberca, aplicado el esquema de control deslizante de segundo orden al glider de CIDESI (Kay Juul H). El desempeño de la ley de control propuesta, muestra un comportamiento satisfactorio en experimentos.

Abstract

In this thesis the project Control of a hybrid glider with roll regulation (Kay Juul H) is presented in detail.

A prior analysis of the state of the art is carried out in autonomous submarine vehicles specifically for hybrid gliders, some as industrial prototypes and academic prototypes. Control laws and their different degrees of freedom are studied.

The main contribution presented in this work is the development of control equations by second order sliding mode, and implementation of the mentioned algorithm for real time control of pitch and roll in a glider. Another contribution is the start-up and integration of the devices that make up the electronic architecture of a vehicle designed in CIDESI, including power electronics, protocols and communication signals.

Finally, the real time results in a swimming pool are presented by using the CIDESI glider (Kay Juul H). The performance of the proposed control law, shows a satisfactory behavior in real time experiments.

Dedicatoria

“Honra a tu padre y a tu madre, como Jehová tu Dios te ha mandado, para que sean prolongados tus días, y para que te vaya bien sobre la tierra que Jehová tu Dios te da.”

Deuteronomio 5:16.

Porque son mi ejemplo y mi orgullo, mis padres.

“Instruye al niño en su camino, y aun cuando fuere viejo no se apartará de él.”

Proverbios 22:6.

Porque me brindaron sabiduría y responsabilidad, mis abuelos.

“En todo tiempo ama el amigo, Y es como un hermano en tiempo de angustia.”

Proverbios 17:17.

Por el apoyo incondicional, mis amigos.

“Jehová te bendiga, y te guarde; Jehová haga resplandecer su rostro sobre ti, y tenga de ti misericordia; Jehová alce sobre ti su rostro, y ponga en ti paz”

Numeros 6:24-26.

Por su paciencia y conocimiento, mis asesores y maestros.

Agradecimientos

A Dios que me ha permitido dar un paso más en el camino, que me ha dado salud, amistad y amor durante toda mi vida.

A mis padres por enseñarme a trabajar, a luchar por mis sueños, por amarme y preocuparse por mi cada día.

A mi amigos y colegas Fernando Fonseca y Miguel Reyna por ayudarme siempre que estuvo en sus manos y hacer esto posible.

A mis asesores Tomás Salgado, Luis Govinda García y Luciano Nava por haberme otorgado su confianza y guiado con paciencia.

A CIDESI, por su espacio y material prestado para el desarrollo de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico a través de la beca de posgrado que se me otorgó.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Justificación	3
1.5. Planteamiento del problema	4
1.6. Organización	5
2. Estado del Arte	6
2.1. Gliders Híbridos	8
2.1.1. SLOCUM	8
2.1.2. FOLAGA	9
2.1.3. PETREL II	10
2.1.4. USM	11
2.1.5. ZJU	11
2.1.6. SUBMARAN	12
2.2. Estado del arte control de gliders híbridos	14
3. Modelado de gliders	16
3.1. Cinemática	21
3.1.1. Marco Inercial	21
3.1.2. Marco móvil o del cuerpo	22

3.1.3.	Marco de la corriente	25
3.2.	Dinámica	27
3.2.1.	Modelo del planeador	27
3.2.2.	Control de las masas internas	29
3.2.3.	Fuerzas de restauración: Flotabilidad y Gravedad	29
3.2.4.	Ecuaciones de movimiento	30
3.2.5.	Términos hidrodinámicos del modelo: Arrastre, Sustentación y Momento	41
3.2.6.	Modelo en el plano vertical-longitudinal	42
4.	Implementación del Glider Híbrido Kay Juul H	46
4.1.	Consideraciones mecánicas	47
4.1.1.	Mecanismo de Roll	47
4.1.2.	Mecanismo de Pitch	48
4.1.3.	Sistema lastre	49
4.1.4.	Soportes	50
4.2.	Arquitectura electrónica	51
4.3.	Adquisición, procesamiento y envío de datos	54
4.4.	Diagrama de flujo del funcionamiento	57
5.	Diseño del controlador y análisis	59
5.1.	Control PD Deslizante de Segundo Orden	59
5.2.	Sintonización del control	64
6.	Resultados Experimentales	65
7.	Conclusiones	75
7.1.	Contribuciones principales	76
7.2.	Trabajo Futuro	76
A.	Protocolo UM7	81

B. Protocolo Bar30 Sensor de Presión	87
C. Planos Mecánicos	88

Índice de figuras

2.1. Clasificación UUV.	8
2.2. Glider SLOCUM desarrollado por Webb Research Corporation.	9
2.3. Glider FOLAGA.	9
2.4. PETREL II.	10
2.5. USM.	11
2.6. ZJU.	12
2.7. SUBMARAN.	13
3.1. Asignación de los ejes en el marco del vehículo.	22
3.2. Vectores y matrices de rotación que definen la posición y orientación del vehículo.	24
3.3. Marco de la corriente con vectores respectivos.	26
3.4. Diagrama de distribución de las masas del vehículo.	28
3.5. Diagrama de distribución de las masas simplificadas.	43
3.6. Definición de ángulos, fuerzas y momentos hidrodinámicos en el plano vertical.	45
4.1. Glider Kay Juul.	46
4.2. Glider Kay Juul H.	47
4.3. Engranajes mecanismo Roll.	48
4.4. Ubicación mecanismo Roll.	48
4.5. Ubicación mecanismo Pitch.	49
4.6. Tanque de lastre, marca Engel con capacidad de 250 ml.	50
4.7. Ubicación de sistema lastre.	50
4.8. Soportes.	51

4.9. Arquitectura electrónica	52
4.10. Puertos de tarjeta Beaglebone Black.	54
4.11. Puertos de tarjeta Beaglebone Black utilizados.	55
4.12. Shiel PCB para Tarjeta Beaglebone Black de prototipo Kay Juul H.	56
4.13. Diagrama de flujo del funcionamiento de glider prototipo Kay Juul H.	58
5.1. Diagrama de fase, inducción de la superficie deslizante.	61
5.2. Diagrama de control Pitch y Roll Prototipo Kay Juul H.	63
6.1. Tanque de agua salada del CIDESI.	65
6.2. Control de Roll con set point 20°.	67
6.3. Control de Pitch set point 20°.	68
6.4. Control de Roll set point 50°.	69
6.5. Banda muerta servomotor.	70
6.6. Respuesta de inclinación del prototipo vs un desplazamiento de la masa.	70
6.7. Pruebas Pitch 30° (profundidad de 2 mts).	72
6.8. Pruebas pitch y roll 30° (profundidad de 2 mts).	73
6.9. Pruebas pitch y roll alberca ITESM Qro. (profundidad 1.3 mts).	74
6.10. Pruebas de control de pitch y roll (alberca ITESM Qro.).	74

Índice de cuadros

3.1. Definición de variables utilizadas en el control de gliders[1]	18
4.1. Descripción de componentes utilizados en glider prototipo Kay Juul H.	53
6.1. Ganancias del control Roll.	67
6.2. Ganancias del control Pitch.	68
6.3. Ganancias del control Roll.	69
6.4. Ganancias del control Pitch.	71
6.5. Ganancias del control Roll.	71

INTRODUCCIÓN

El hombre realiza estudios científicos sistemáticos sobre el medio marino y sus recursos para comprender al océano como parte del mundo y para utilizarlo inteligentemente en beneficio propio. para ello se auxilia de ciencias exactas y naturales: física, química, matemáticas, geología y biología. aunque el conocimiento científico de los océanos es aún incipiente, la cantidad de datos con los que se cuenta es tan grande, que es imposible que una sola ciencia los englobe. por ello, el estudio actual de los océanos es realizado por un complejo de ciencias y tecnologías que, en su conjunto, constituye las llamadas ciencias del mar, las cuales vienen a sustituir a la oceanografía u oceanología, considerada hasta hace poco como la única ciencia del mar.

Durante los últimos años, el uso de vehículos robots submarinos ha aumentado rápidamente, desde que estos vehículos se puede operar en las áreas más profundas y más arriesgadas que buzos no pueden alcanzar. Se trata de un área de diversas aplicaciones en el mundo real, ya que permite y facilita la exploración, la búsqueda y rescate y estudios científicos en zonas muy profundas del mar, a pesar de problemas que se pueden presentar, como la dinámica no lineal y acoplada, así como la naturaleza del ruido del medio submarino, así como también la carencia de puntos de referencia y las limitaciones en las comunicaciones por efecto del agua.

El movimiento de un glider se produce en un patrón diente de sierra, mientras se encuentra en la superficie comienza a llenar un lastre o vejiga con líquido, esto hace que la densidad del vehículo crezca, rebasando la del agua, y comience a hundirse. De la misma forma la masa móvil comienza a cambiar su posición para cambiar el centro de gravedad del vehículo

y comenzar el descenso, planeando con ayuda de las alas, a esta etapa se le llama configuración "nariz abajo". Para emerger, una vez alcanzada la profundidad deseada o área de exploración a cubrir, el glider comenzará a expulsar el líquido del lastre y a desplazar la masa móvil, volviéndose menos denso que el agua y alcanzando la configuración "nariz arriba" mientras asciende. Estos cambios en las masas (valores y posiciones) se repiten una y otra vez generando la trayectoria en patrón diente de sierra.

Actualmente los glider comerciales pueden realizar misiones desde 9 meses hasta un año de duración, sin que sus baterías deban ser recargadas. Pero al ser dispositivos comercializados sus componentes y funcionamiento es información resguardada celosamente. A pesar de ello, es bien conocida la necesidad de probar nuevas estrategias que mejoren su desempeño durante el seguimiento de trayectorias. Esto último es la razón por la cual una gran cantidad de universidades y centros de investigación realizan proyectos relacionados con el diseño, la construcción, instrumentación y puesta en marcha de gliders prototipo.

1.1. Objetivo general

Control de los ángulos de inclinación ($pitch(\theta)$ y $roll(\phi)$) mediante el diseño, construcción e implementación de un sistema que permita el movimiento en estos ángulos para mejorar el seguimiento de trayectorias con el esquema de control deslizante de segundo orden.

1.2. Objetivos específicos

- Estudio y análisis del modelo de movimiento de un vehículo tipo glider.
- Diseñar, construir e implementar una arquitectura electrónica de control.
- Controlar mediante leyes de control deslizantes el prototipo de Glider Híbrido.
- Realizar pruebas en alberca para confirmar los conceptos y respuesta de dicho control.
- Generar la base para el diseño de gliders mejorados en trabajos posteriores.

1.3. Hipótesis

Es posible mejorar el desempeño de los gliders mediante la mejora en su algoritmo de control de seguimiento de trayectorias empleando control de modos deslizantes.

1.4. Justificación

La necesidad de hacer el proceso de toma de datos oceanográficos más eficiente ha dado pie al desarrollo de estas herramientas como el Glider Híbrido, capaz de deslizarse dentro del agua como un Glider normal y que además cuenta con uno o dos propulsores haciendo de este un vehículo más veloz.

Durante las últimas dos décadas han sido temas principales de investigación y desarrollo en universidades de todo el mundo. Este trabajo pretende estudiar la tecnología de gliders híbridos para sentar bases en diseños propios de CIDESI de estos sistemas.

Cuando medimos parámetros oceanográficos como la temperatura y salinidad del mar, se investiga cómo estos parámetros influyen en:

- Corrientes marinas
- Clima
- Formación de huracanes

CIDESI es una de esas instituciones que han decidido apostar y aportar al tema, encontrando los siguientes áreas de oportunidad y razones para hacerlo:

- El estado del arte revela que los controladores implementados en gliders comerciales son convencionales PD's y PI's.
- Mejora en el control implica mejora en la precisión de seguimiento de trayectorias y reducción del tiempo de realización de las misiones, aportando directamente al incremento de autonomía del vehículo.

1.5. Planteamiento del problema

Dentro de su propósito inicial el glider Kay Juul cumple con sus objetivos, sin en cambio este trabajo se concentra en la mejora del prototipo. El Kay Juul presenta ciertas limitaciones como:

1. Limitante de virar en Roll.
2. Limitante de dar velocidad al vehículo en caso de perturbaciones.
3. Limitante para ajustar la posición de la masa automáticamente para una inclinación deseada.

La limitante para ajustar la posición de la masa automáticamente para una inclinación deseada es dado a que en el control de Kay Juul se caracterizó el movimiento de la masa móvil (banco de baterías) con respecto a su respuesta de inclinación en el ángulo $\text{pitch}(\theta)$. El control actúa directamente en la posición de la masa (banco de baterías) y no en el ángulo de respuesta de inclinación del vehículo $\text{pitch}(\theta)$.

1.6. Organización

El documento se organiza de la siguiente manera:

En el presente capítulo 1 se introduce al tema.

En capítulo 2 se proporciona el panorama general de las estrategias implementadas en gliders para el control de trayectorias, estrategias enfocadas al control parcial del total de los grados de libertad del glider.

En capítulo 3 se presenta el modelo de un glider conocido mediante el cálculo de momentos, energías totales y utilizando también las leyes de Newton para determinar las ecuaciones de movimiento de estos dispositivos, partiendo de la configuración general de un glider a la más simplificada.

Después en capítulo 4 se describe cada uno de los dispositivos (sensores y elementos finales de control), su funcionamiento, puesta en marcha e integración dentro de la plataforma electrónica que se implementó en este trabajo.

En capítulo 5 presenta una descripción detallada del controlador elegido, sus características principales, el proceso de selección de variables a controlar y método de sintonización del mismo.

En capítulo 6 se plasman los resultados del control aplicado en pruebas desarrolladas en alberca. Finalmente se muestran las conclusiones del trabajo realizado, se mencionan observaciones, el trabajo futuro y las líneas de investigación que se desarrollan con la culminación de la tesis.

ESTADO DEL ARTE

Un glider en aeronáutica se define como un planeador capaz de deslizarse en corrientes de aire sin la necesidad de un motor; en la robótica submarina un AUV glider (Autonomous Underwater Vehicle) se define como un planeador capaz de deslizarse en el agua sin la necesidad de un motor. Dentro de la literatura se mencionan diferentes tipos de vehículos submarinos, ROV (Remotely Operated Vehicles), gliders y sus diferentes clasificaciones dependiendo de las prestaciones de cada uno de ellos, como por ejemplo su profundidad, o tipo de propulsión.

En general existen dos clasificaciones principales en los vehículos submarinos que son utilizados como herramientas para diversos propósitos oceanográficos, los vehículos que son tripulados llamados MUV (Manned Underwater Vehicle) y los no tripulados llamados UUV (Unmanned Underwater Vehicle), en esta última clasificación se encuentra el tema principal de este presente trabajo.

Los vehículos submarinos no tripulados UUV se dividen a su vez en 3 subcategorías las cuales se pueden observar en el diagrama de la Figura 2.1 y se mencionan a continuación.

- AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Vehículo submarino autónomo.
- ROV (Remotely Operated Vehicle). Vehículo submarino remotamente operado.
- AUV/ROV. Vehículo híbrido que puede desempeñar la función de AUV o ROV.

En la actualidad se cuenta con una amplia variedad de vehículos submarinos autónomos AUV que son utilizados para propósitos comerciales, militares y de investigación, los cuales cuentan con sofisticados sistemas de navegación y sensores para las tareas o misiones específicas a desempeñar, sin necesidad de ser controlados remotamente. Para propósitos de

este documento, los vehículos AUV se clasifican por su método de propulsión de la siguiente manera:

- AUV Clásico. Vehículo submarino autónomo con sistema de propulsión por medio de thrusters (propelas) que mantiene la dirección y velocidad en curso.
- AUV Glider. Vehículo submarino autónomo con sistema de propulsión por medio de un sistema variable de flotabilidad VBD (Variable Buoyancy Device) que permite al vehículo planear bajo el agua.
- AUV Biomimético. Vehículo submarino autónomo que se impulsa por medio de un sistema que imita el movimiento de animales marinos.

Finalmente dentro de los AUV se encuentran los Gliders normales y los Gliders Híbridos, en estos últimos por tener algunos ejemplos están: Slocum, Folaga, Petrel II, USM, se caracterizan por tener un propulsor, haciendo de estos vehículos no tripulados mas veloces.

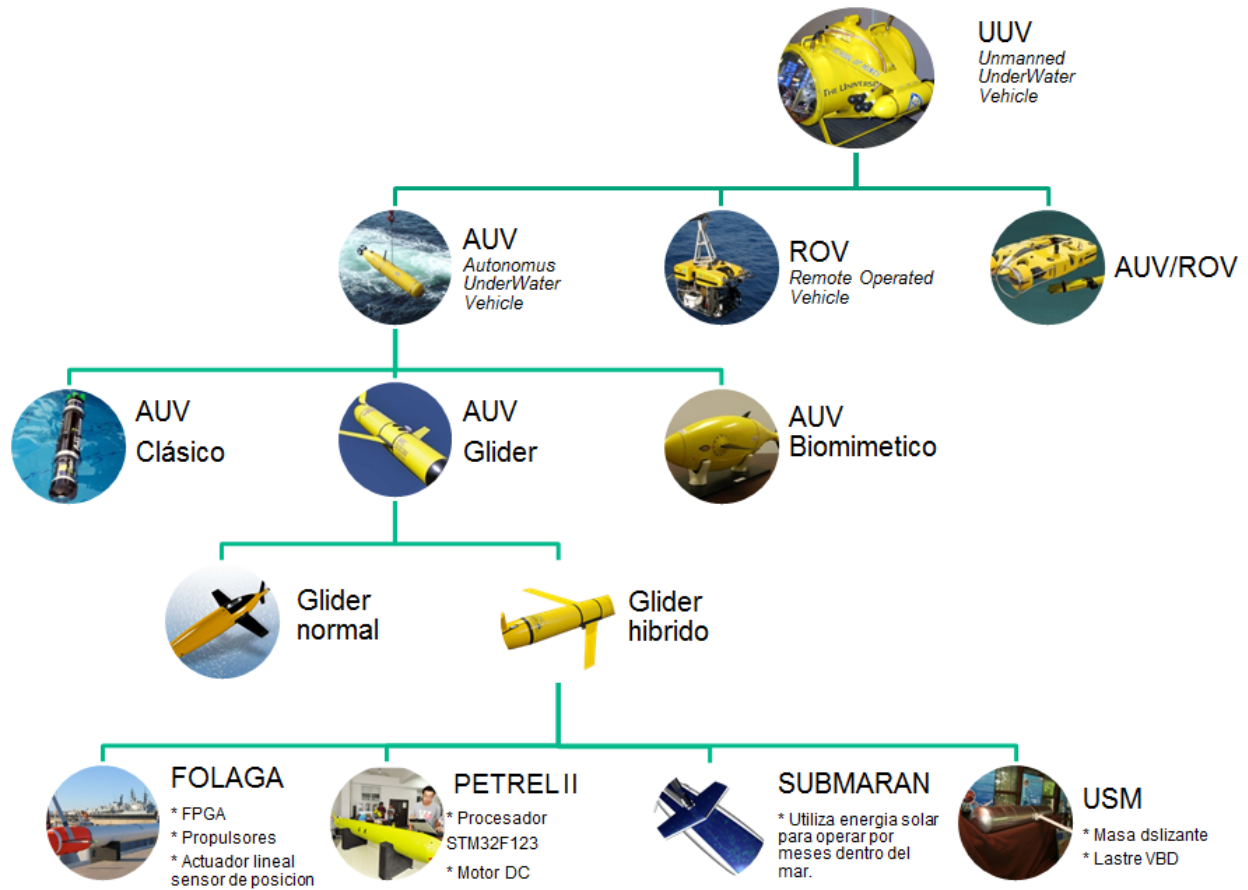


Figura 2.1: Clasificación UUV.

2.1. Gliders Híbridos

2.1.1. SLOCUM

El Slocum de WRC (Webb Research Corporation) fue diseñado, construido y probado en campo. El proceso de diseño se facilitó al comparar el desempeño del glider en el agua con un simulador hidrodinámico. El glider que planeaba en ambas direcciones, hacia arriba y abajo, incluía un piloto automático y un registro de vuelo, fue probado en Febrero y Noviembre de 1991 en el lago Seneka, NY. El prototipo probado en esas fechas tiene todas las características principales vistas hoy en día en los glider submarinos, es decir una bomba eléctrica de flotabilidad, con alas y cola adecuadas, y una masa interna móvil para controlar

los ángulos de cabeceo (pitch) y balanceo (roll)[7].



Figura 2.2: Glider SLOCUM desarrollado por Webb Research Corporation.

2.1.2. FOLAGA

El AUV Folaga que se muestra en la Figura 2.3, fue originalmente diseñado para aplicaciones relacionadas con el monitoreo ambiental. La versión más actualizada de este vehículo permite realizar misiones de inspección y de seguridad debido a su gran maniobrabilidad, operación autónoma y rápida integración de distintos módulos de carga.



Figura 2.3: Glider FOLAGA.

Una de las características principales de este vehículo es su alta maniobrabilidad, teniendo

mecanismos de actuación similares a los gliders y de los AUVs con propulsores, además teniendo la capacidad de rotar sobre su eje que es una característica distintiva de los ROVs, combinando en su movimiento el uso del método de flotación, el movimiento del centro de masa del vehículo y la altitud para realizar los desplazamientos deseados. En su área de carga pueden incluirse diferentes tipos de sensores y la integración de los sensores para la misión es sencilla debido a su diseño modular [14].

2.1.3. PETREL II

El AUV Petrel II mostrado en la Figura 2.4, diseñado por la Universidad de Tianjin en el 2012, combina las características tradicionales de un glider con los de un AUV impulsado por thrusters. Es equipado con un sistema VBD de bomba recíprocamente, un sistema de propulsión compacto, control de giro y orientación con una unidad de regulación actuada y un par de alas fijas al cuerpo. Este vehículo tiene dos modos de operación, el primero de ellos es el movimiento del vehículo en modo glider mediante el sistema VBD y el segundo mediante el sistema de propulsión por thrusters para mantener el nivel de trayectoria [3].



Figura 2.4: PETREL II.

El Petrel II puede cambiar automáticamente entre los 2 modos de operación de acuerdo a los comandos establecidos o las circunstancias del ambiente. En el modo glider el vehículo puede alcanzar velocidades de 0.8 knots (0.25 m/s) y en el modo de propulsor puede alcanzar velocidades de 3 knots (1.54 m/s). Este vehículo es diseñado particularmente para realizar misiones en corrientes fuertes, además que para la mejora de la capacidad de velocidad, el vehículo tiene características bajo arrastre y altas profundidades de operación, bajo peso.

2.1.4. USM

El AUV USM es un vehículo diseñado con fines de investigación y desarrollo tecnológico por la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Sains Malasia (USM). Isa y Arshad [4] mencionan en su trabajo que el vehículo USM ha sido diseñado con el propósito de incrementar la eficiencia de gliders y puede ser actuado por un sistema de flotación como un glider o por un sistema de propulsión por un thruster[4].



Figura 2.5: USM.

El casco de presión del vehículo es de geometría cilíndrica, las alas y el timón son controlados independientemente, contiene una masa deslizante, un VBD de embolo simple y un thruster. En términos de sistemas de control, este vehículo se considera un MIMO (Múltiple Inputs Multiple Outputs) dado que tiene 3 actuadores externos y dos actuadores internos. Los actuadores internos controlan el ángulo de inclinación y el sistema de flotación.

2.1.5. ZJU

El vehículo submarino ZJU que se muestra en la Figura 46, es un prototipo desarrollado por la Universidad de Zhejiang, considerado como un glider híbrido, debido a que puede operar en modalidad glider o puede ser impulsado por medio de un thruster acoplado en la parte posterior del vehículo.

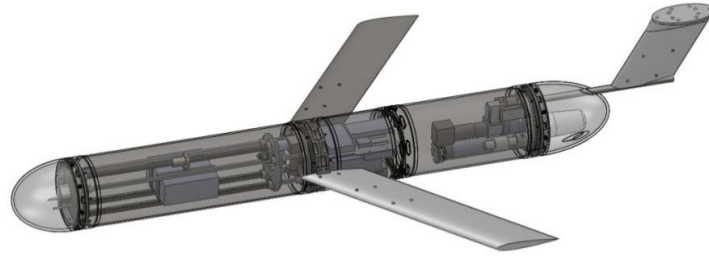


Figura 2.6: ZJU.

ZJU es un Glider híbrido que tiene una velocidad horizontal de aproximadamente 0.9 m/s o mayor en modo AUV por lo que puede vencer la influencia de las corrientes. En operación normal el vehículo viaja a velocidades de 0.3 m/s a 0.5 m/s para reducir la fuerza de arrastre y obtener mayor duración y alcance. Tal como se muestra en la Figura 2.6, el vehículo se divide en 6 secciones.

El sistema VBD del vehículo es diseñado con un depósito de aceite externo (bladder), el cual se infla y desinfla usando una bomba recíprocamente para transferir el aceite entre el depósito que se encuentra en el interior del casco de presión del vehículo y se transfiere al depósito externo (bladder) para variar con ello su densidad[8].

2.1.6. SUBMARAN

El AUV Submaran que se muestra en la Figura 2.7, es un proyecto de desarrollo tecnológico de la empresa Ocean Aero cuya creación es derivada del proyecto Submaran, contando con la inversión de la empresa Teledyne Technologies y la empresa i7 Engineering que es una firma especializada en desarrollo de sistemas avanzados en eléctrica, mecánica, software y robots autónomos, principalmente para la industria aeroespacial y de defensa de los Estados Unidos.

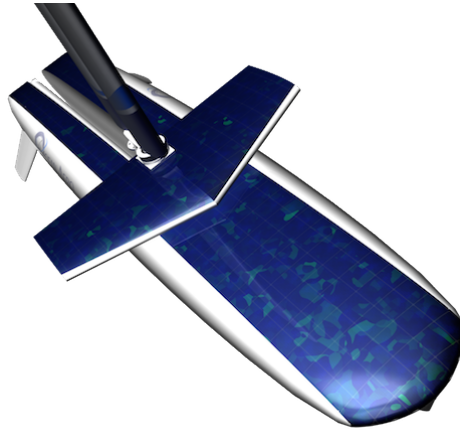


Figura 2.7: SUBMARAN.

Los ingenieros de i7 Engineering están trabajando con el equipo de Ocean Aero para el desarrollo de cambios substanciales en los vehículos autónomos, como son: los sistemas robóticos, eléctricos y de comunicación impulsados por energía solar y eólica para obtener un vehículo capaz de operar por meses y que pueda ser configurado para una amplia variedad de misiones para: fines científicos, académicos, militares y comerciales. El vehículo cuenta con un sistema de flotación para operación en modo glider, un mástil veleta para navegación en la superficie y thrusters eléctricos de propulsión adicional.

2.2. Estado del arte control de gliders híbridos

Desde su concepción los gliders han despertado gran interés por parte de la comunidad científica, y día a día se trabaja para mejorar estos sistemas, algunos de los avances e investigaciones en las áreas de modelado, control y optimización de trayectorias más interesantes serán descritos a continuación:

2010 S. X. Wang, X. J. Sun, J. G. Wu, X. M. Wang, H. W. Zhang, en la universidad de Tianjin, China realizan el análisis del modelo y algunas pruebas del PETREL como el seguimiento de algunas trayectorias, con su publicación: “*Motion Characteristic Analysis of a Hybrid-Driven Underwater Glider*” [3].

2011 Maziyah Mat Noh, Mohd Rizal Arshad, trabajan en el diseño del controlador para el vehículo USM con propuestas de un LQR y PID, en su publicación demuestran que ambos controles son satisfactorios en el control del PITCH pero para cuestiones en el control de profundidad el PID es deficiente en comparación con el LQR. “*Depth and pitch control of USM underwater glider: Performance comparison PID vs. LQR*” [4].

2011 Maziyah Mat Noh, Mohd Rizal Arshad, continúan en su trabajo con el control LQR en poca profundidad (mno mas de 30 mt), obteniendo el modelo del glider ; “*Modeling of USM underwater glider (USMUG)*” [4].

2013 Isa, K; Arshad, M.R. Trabajan en la simulación del modelo del USM con un control LQR un control con el cual se manejaran 6 GDL basados en la aproximación de Newton-Euler, y han estimado los coeficientes hidrodinámicos basados en la teoría slender-body. “*Propeller-driven underwater glider modelling and motion control*” [4].

2014 Yang,C; Peng,S. Trabajan realizando pruebas de estabilidad con el ZJU un prototipo academico en alberca, sus resultados muestran que el ZJU funciona bien y puede funcionar

como una plataforma de sensado para muestreo en el oceano., en su publicación: *“Performance and stability analysis for ZJU glider”* [8].

2015 Eng You y Mandar Chitre; realizan el modelado y diseño mecánico del STARFISH AUV en su trabajo *“Roll Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using an Internal Rolling Mass”* [11].

MODELADO DE GLIDERS

En este capítulo se describe el modelo dinámico de un planeador submarino. Para esto se considera que el planeador tiene un cuerpo con alas fijas, control del lastre, control sobre las masas móviles dentro del mismo, y superficies de control como el timón. El modelo se desarrolla utilizando los principios básicos sin perder de vista elementos importantes del dispositivo, pero tratando de no caer en complejidades innecesarias. Las consideraciones esenciales para el modelado de gliders son la distribución de las masas internas, su geometría, las fuerzas de restauración de gravedad y flotabilidad, las implicaciones hidrodinámicas como son las fuerzas de sustentación, arrastre y momento, efectos por masas e inercias adheridas debido al desplazamiento en medio de un fluido, además del control en sus masas internas y el lastre del vehículo.

Una vez expresado dicho modelo, es posible colocar los parámetros de un glider en particular y obtener su dinámica por medio de las ecuaciones de movimiento que expresarán su comportamiento ante condiciones definidas. Se parte de un modelo aplicable para las configuraciones más complejas de un glider, y se utiliza el modelo particular y de configuración simplificada del glider ROGUE[1]. Este modelo se analizó y comprendió con la finalidad de aplicar leyes de control en un simulador que arrojaría las primeras expectativas del comportamiento del vehículo al someterlo a la ley de control propuesta.

El glider se modela como un cuerpo rígido con alas fijas, donde la geometría del mismo juega un papel muy importante sobre los efectos hidrodinámicos, por lo cual se considera tiene simetría a lo largo de sus tres ejes. Además, el fuselaje del glider se considera como un cuerpo hueco cuya masa está uniformemente distribuida, en su interior se encuentran las

tres masas que definirán la estabilidad, y comportamiento del glider: m_b , \bar{m} y m_w , es decir la masa del lastre, la masa móvil y la masa fija respectivamente. A continuación en la Tabla 3.1 se muestra la nomenclatura utilizada para el modelado de gliders.

Cuadro 3.1: Definición de variables utilizadas en el control de gliders[1]

Nombre	Descripción
α	ángulo de ataque, $\cos \alpha = v_1 / \sqrt{v_1^2 + v_3^2}$
\mathbf{b}	vector de posición del vehículo desde el marco inercial
β	ángulo de deslizamiento lateral
CB	centro de flotabilidad y centro del marco del vehículo
CG	centro de gravedad
D	fuerza de arrastre o drag
\mathbf{D}_f	término cruzado de masa agregada
$\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$	vectores unitarios del marco del cuerpo, ejes 1,2 y 3
$\bar{\mathbf{F}}$	fuerza total en coordenadas del cuerpo
\mathbf{F}_{ext}	fuerza externa sobre el vehículo en coordenadas del cuerpo
f	fuerza externa sobre el vehículo en coordenadas inerciales
\mathcal{I}	matriz identidad
\mathbf{I}	matriz de masas/inercias totales del sistema vehículo/fluido
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	vectores unitarios en las direcciones x, y, z
\mathbf{J}_f	matriz de inercias adheridas
\mathbf{J}_h	inercia del cuerpo (excluye inercias de \bar{m} y m_w)
\mathbf{J}_s	inercia de la masa estacionaria
\mathbf{J}	$\mathbf{J}_h + \mathbf{J}_s$
J_i	i -ésimo elemento diagonal de \mathbf{J}
L	fuerza de sustentación o lift
\mathbf{M}	sumatoria de masas adheridas y del cuerpo
\mathbf{M}_f	matriz de masas adheridas
M_{DL}	momento viscoso
m	masa del fluido desplazado
...	...

Nombre	Descripción
\bar{m}	masa móvil
m_b	masa variable o lastre
m_{fi}	i -ésimo elemento diagonal de M_f
m_i	i -ésimo elemento diagonal de M
m_h	masa del cuerpo uniformemente distribuido
m_s	masa estacionaria del cuerpo, $m_s = m_h + m_w + m_b$
m_v	masa total del vehículo, $m_v = m_s + \bar{m}$
m_w	masa fija (punto de masa para el cuerpo distribuido no uniformemente)
m_0	masa excedida, $m_0 = m_v - m$
Ω	velocidad angular en coordenadas del cuerpo
Ω_i	i -ésimo componente de Ω
\mathbf{P}	momento lineal total en coordenadas del cuerpo
\mathbf{P}_b	momento lineal de m_b en coordenadas del cuerpo
\mathbf{P}_p	momento lineal de \bar{m} en coordenadas del cuerpo
\mathbf{P}_w	momento lineal de m_w en coordenadas del cuerpo
\mathbf{p}	momento lineal total en coordenadas del marco inercial
\mathbf{p}_b	momento lineal de m_b en coordenadas del marco inercial
\mathbf{p}_p	momento lineal de \bar{m} en coordenadas del marco inercial
\mathbf{p}_w	momento lineal de m_w en coordenadas del marco inercial
$\mathbf{\Pi}$	momento angular total (marco del cuerpo)
$\boldsymbol{\pi}$	momento angular total (marco inercial)
ϕ	ángulo de alabeo (roll)
ψ	ángulo de guiñada (yaw)
\mathbf{R}	matriz de rotación para la orientación del vehículo
$\mathbf{R}_{\mathbf{BW}}$	matriz de rotación marco del cuerpo al de viento
$\mathbf{R}_{\mathbf{WB}}$	matriz de rotación marco del viento al del cuerpo
...	...

Nombre	Descripción
\mathbf{R}_α	matriz de rotación alrededor del eje \mathbf{w}_2 por el ángulo α
\mathbf{R}_β	matriz de rotación alrededor del eje \mathbf{w}_3 por el ángulo β
\mathbf{r}_b	vector de posición de CB a m_b
\mathbf{r}_p	posición de la masa móvil \bar{m} en coordenadas del cuerpo
r_{pi}	i -ésimo componente de r_p
\mathbf{r}_s	vector de posición de CB a m_s
\mathbf{r}_w	vector de posición desde CB a m_w
SF	side force (from hydrodynamics)
sm	subíndices designados para simplificar arreglo de masas internas
θ	Ángulo de cabeceo (Pitch)
$\bar{\mathbf{T}}$	torque total en coordenadas del cuerpo
\mathbf{T}_{ext}	torque total externo en coordenadas del cuerpo
$\boldsymbol{\tau}_{ext}$	torque total externo en coordenadas del cuerpo
T	energía cinética total, $T = T_s + T_p + T_f$
T_b	energía cinética de la masa del lastre m_b
T_f	energía cinética del fluido
T_p	energía cinética de la masa móvil
T_s	energía cinética de la masa estacionaria del cuerpo m_s
T_w	energía cinética de la masa m_w
\mathbf{u}	vector de entradas de control
$\bar{\mathbf{u}}$	$(u_1 \ u_2 \ u_3)^T$, vector de fuerza sobre el punto de masa móvil, $\bar{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{P}}_p$
\mathbf{u}_b	$(u_{b1} \ u_{b2} \ u_{b3})^T$ fuerza de control sobre la masa del lastre, $\mathbf{u}_b = \dot{\mathbf{P}}_b$
u_4	control de cambio de la masa variable, $u_4 = \dot{m}_b$
\mathbf{u}_w	$(u_{w1} \ u_{w2} \ u_{w3})^T$, fuerza de control sobre la masa m_w , $\mathbf{u}_w = \dot{\mathbf{P}}_w$
V	velocidad en el plano vertical, $V = \sqrt{(v_i^2 + v_3^2)}$
V_d	velocidad deseada en el plano vertical
...	...

Nombre	Descripción
V_r	velocidad relativa al fluido, $V_r = \mathbf{v}_r $
\mathbf{v}	velocidad en coordenadas del cuerpo
v_i	i -ésimo componente de v
\mathbf{v}_c	velocidad de la corriente (relativa al marco inercial)
\mathbf{v}_r	velocidad del glider relativa al fluido
\mathbf{w}	vector de aceleraciones de las masas internas (en el marco del cuerpo)
\mathbf{w}_p	vector de aceleraciones de la masa \bar{m} (en el marco del cuerpo), $\mathbf{w}_p = \ddot{\mathbf{r}}_p$
\mathbf{w}_b	vector de aceleraciones de la masa m_b (en el marco del cuerpo), $\mathbf{w}_b = \ddot{\mathbf{r}}_b$
\mathbf{w}_w	vector de aceleraciones de la masa m_w (en el marco del cuerpo), $\mathbf{w}_w = \ddot{\mathbf{r}}_w$
x, y, z	componentes del vector de posición del vehículo \mathbf{b}
ξ	ángulo de trayectoria, $\xi = \theta - \alpha$
ξ_d	ángulo de trayectoria deseada

3.1. Cinemática

A continuación se definen los tres marcos de referencia utilizados para calcular la posición y orientación del glider.

3.1.1. Marco Inercial

Considérese un marco de referencia inercial mente fijo y no rotativo \mathbf{xyz} . Para vehículos marinos puede tomarse un marco fijo en la tierra donde se pueden despreciar sus aceleraciones. Sean \mathbf{x} e \mathbf{y} ejes internos del plano horizontal, perpendicular a la gravedad. El eje \mathbf{z} está en la dirección del vector de gravedad y es positivo hacia abajo. Sean \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} los vectores unitarios en las direcciones \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} respectivamente. Esta elección del marco inercial es consistente con la literatura de vehículos submarinos como en [1]. El marco inercial puede escogerse como $\mathbf{z} = 0$ coincidente con la superficie del agua, en este caso \mathbf{z} corresponde a la profundidad.

3.1.2. Marco móvil o del cuerpo

El marco coordenado del cuerpo del vehículo se coloca con el origen en el centro de flotabilidad (CB) del mismo y sus ejes alineados con los ejes principales del vehículo. Sea el eje \mathbf{e}_1 del cuerpo el que está a lo largo del eje longitudinal del vehículo (positivo en la dirección de la nariz del submarino), sea el eje \mathbf{e}_2 del cuerpo ubicado en el plano de las alas y el eje \mathbf{e}_3 del cuerpo en la dirección ortogonal a las alas, como se ve en la figura 3.1.

La orientación del vehículo está dada por la matriz de rotación \mathbf{R} . \mathbf{R} mapea los vectores expresados con respecto al marco inercial y puede ser parametrizada usando ángulos de Euler o cuaterniones, en este trabajo se utilizan los primeramente mencionados (guiñada, cabeceo, alabeo o yaw, pitch, roll en inglés), siendo ésta la convención utilizada en aeronaves y vehículos submarinos.

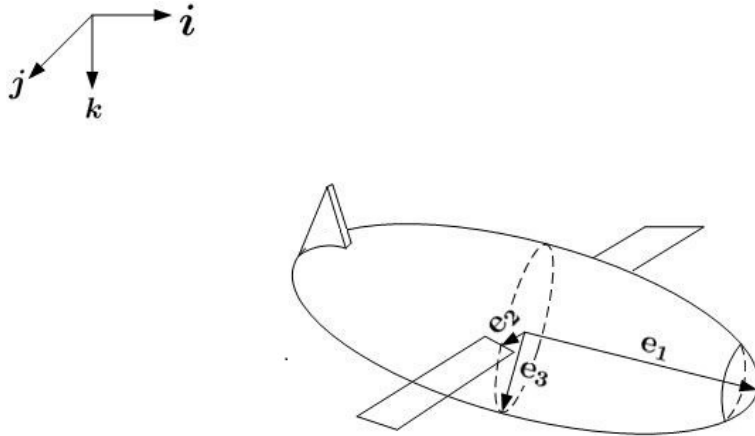


Figura 3.1: Asignación de los ejes en el marco del vehículo.

La matriz de rotación \mathbf{R} tiene las siguiente propiedades:

1. \mathbf{R} es una matriz 3×3 .
2. \mathbf{R} es ortogonal $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.
3. $\det(\mathbf{R}) = 1$.

Los ángulos de Euler definen la orientación de un vehículo del marco móvil al inercial, por medio de tres rotaciones alrededor de ejes coordenados específicos. Estos ángulos son conocidos como: Guiñana (yaw) ψ , cabeceo (pitch) θ y alabeo (roll) ϕ . El ángulo de guiñada (ψ) se define como positivo (en sentido de las manecillas del reloj) visto desde arriba, el de cabeceo (θ) es positivo cuando se encuentra con la nariz arriba (nose-up), y el de alabeo (ϕ) es positivo con el ala derecha hacia abajo.

$$\mathbf{R}_\psi^T = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_\theta^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_\phi^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

La rotación que describe la orientación del vehículo respecto al marco inercial es

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\phi$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

La rotación que describe la orientación del marco inercial respecto del marco del cuerpo es

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}_\phi^T \mathbf{R}_\theta^T \mathbf{R}_\psi^T$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \phi \cos \psi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

La posición del glider, $\mathbf{b} = (x, y, z)^T$, es el vector que se genera desde origen del marco inercial hasta el origen del marco del vehículo, ver figura 3.2. El vehículo se desplaza con

velocidad traslacional $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^T$ relativa al marco inercial y con velocidad angular $\mathbf{\Omega} = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)^T$, ambas expresadas en el marco del vehículo.

Se define el operador $\hat{\cdot}$ tal que para el vector $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$,

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Entonces, para el vector $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3)^T$,

$$\hat{\mathbf{x}}\mathbf{y} = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}, \quad (3.5)$$

en resumen, el operador $\hat{\cdot}$ mapea al vector \mathbf{x} a la representación matricial anti simétrica del producto cruz del operador.

Utilizando esta notación, la cinemática del glider está dada por

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{\Omega}} \quad (3.6)$$

$$\dot{\mathbf{b}} = \mathbf{R}\mathbf{v} \quad (3.7)$$

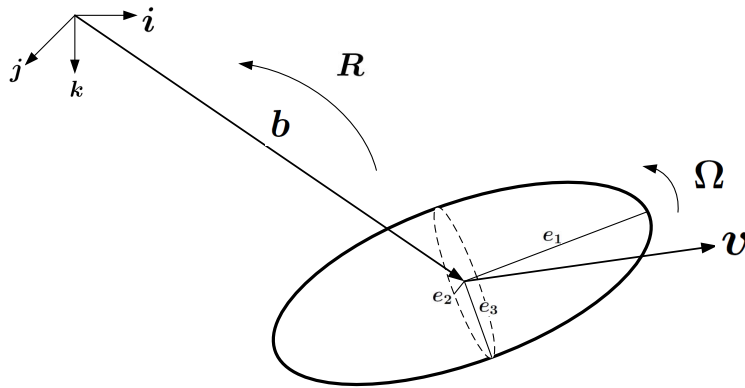


Figura 3.2: Vectores y matrices de rotación que definen la posición y orientación del vehículo.

3.1.3. Marco de la corriente

Las fuerza hidrodinámicas sobre un vehículo submarino dependen de la velocidad y orientación del vehículo relativos al fluido a través del cual se mueve [1]. La velocidad relativa del glider al fluido es \mathbf{v}_r , es especificada a continuación. En ausencia de corrientes, es decir, cuando el vehículo está referenciado por lo menos con respecto al marco inercial de referencia, \mathbf{v}_r es igual a la velocidad \mathbf{v} . Se asigna un marco de referencia de la corriente para localizar la orientación del glider con respecto a la velocidad relativa del glider a través del agua, \mathbf{v}_r .

Basándose en la literatura estándar para aeronaves, la orientación del marco del viento relativo al marco del vehículo será descrita por dos ángulos aerodinámicos, el ángulo de ataque α y el ángulo de desplazamiento lateral β . El marco de referencia de la corriente se define tal que un eje esté alineado con \mathbf{v}_r . Los ángulos aerodinámicos se definen como:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{v_{r3}}{v_{r1}}\right) \text{ y } \beta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{r2}}{\|\mathbf{v}_r\|}\right)$$

Estos ángulos están bien definidos para velocidades diferentes a cero con el uso del arcotangente del cuarto cuadrante.

El ángulo de ataque α es el ángulo que se forma desde el eje \mathbf{e}_1 al vector $(v_{r1}, 0, v_{r3})^T$, la proyección del vector \mathbf{v} sobre el plano $\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3$. El ángulo de desplazamiento lateral β es definido como el ángulo generado por la proyección de \mathbf{v}_r sobre el plano $\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3$ y el vector \mathbf{v}_r . Los ángulos α y β y sus direcciones positivas son mostrados en la figura 3.3.

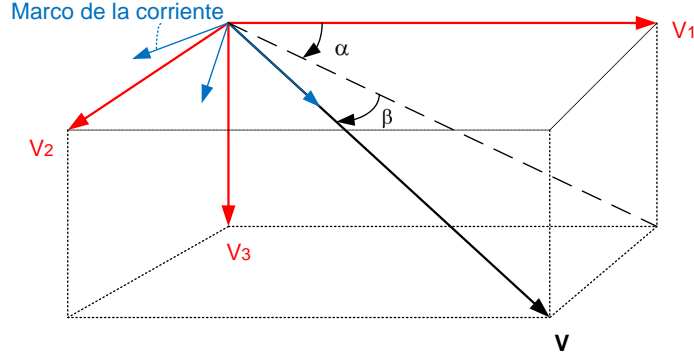


Figura 3.3: Marco de la corriente con vectores respectivos.

Se define el marco del viento para que su origen se encuentre en el centro de flotabilidad (CB) y su orientación definida por la velocidad del glider a través del agua como se explica a continuación. Dejemos que eje del viento \mathbf{w}_1 apunte en dirección a \mathbf{v}_r , la velocidad del glider relativa al agua. Los ejes de orientación del viento \mathbf{w}_2 y \mathbf{w}_3 están definidos por la siguiente secuencia de rotaciones:

1. En principio el marco del viento coincide con el del vehículo, con los ejes \mathbf{w}_1 , \mathbf{w}_2 y \mathbf{w}_3 alineados con los ejes \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 y \mathbf{e}_3 , respectivamente.
2. Rotación con respecto a \mathbf{w}_2 con un ángulo α . Un α positivo se muestra en la figura 3.3. $\mathbf{R}_\alpha(\alpha)$ representa esta rotación.
3. Rotación con respecto a \mathbf{w}_3 con un ángulo β . $\mathbf{R}_\beta(\beta)$ representa esta rotación.

Nótese que el eje \mathbf{w}_3 del marco del viento cae sobre el plano $\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3$ del cuerpo. La rotación del marco del cuerpo al marco del viento está dada por $\mathbf{R}_{BW}(\alpha, \beta) = \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\alpha$.

$$\mathbf{R}_\alpha(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \mathbf{R}_\beta(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{R}_{BW}(\alpha, \beta) = \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

La rotación que define la orientación del marco del viento con respecto al del cuerpo es simplemente su transpuesta,

$$\mathbf{R}_{BW}(\alpha, \beta) = (\mathbf{R}_\alpha)^T (\mathbf{R}_\beta)^T = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

\mathbf{R}_{BW} mapea vectores expresados, con respecto al marco del viento, coordenadas del marco del cuerpo. Al escribir las velocidades relativas al marco del cuerpo en términos de la velocidad relativa $V_r = |\mathbf{v}_r|$ y los ángulos aerodinámicos se obtiene:

$$\mathbf{v}_r = \begin{pmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \\ v_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \beta \cos \alpha \\ V_r \sin \beta \\ V_r \cos \beta \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

3.2. Dinámica

En esta sección se presenta el desarrollo de las ecuaciones de movimiento de un glider a partir del análisis de energía para luego aplicar las leyes de Newton, y finalmente obtener la dinámica del vehículo[1].

3.2.1. Modelo del planeador

Los cálculos y análisis aquí presentados se realizan para un vehículo cuya forma en cuerpo y alas es general. Se modela un planeador submarino como un cuerpo rígido, inmerso en un fluido, con alas y timón fijos. El glider aquí modelado cuenta con control en la masa variable o lastre, con ello se controla su flotabilidad, y cuenta también con control sobre las

masas internas. El marco coordinado del vehículo tiene su origen en el CB y sus ejes están alienados con los ejes principales del cuerpo, tal como fue descrito anteriormente.

La masa estacionaria total del glider m_s , o masa del cuerpo, es la sumatoria de tres términos: $m_s = m_h + m_w + m_b$. m_h representa la masa del fuselaje, la cual se considera uniformemente distribuida a través del cuerpo del glider. Tres masas internas puntuales son incluidas en el modelo. m_w es un punto de masa fijo que se considera como una compensación del CB . m_b es el lastre o punto de masa variable, el cual puede estar fuera del CB . La masa móvil es \bar{m} . Los vectores de posición de dichas masas se muestran en la figura 3.4.

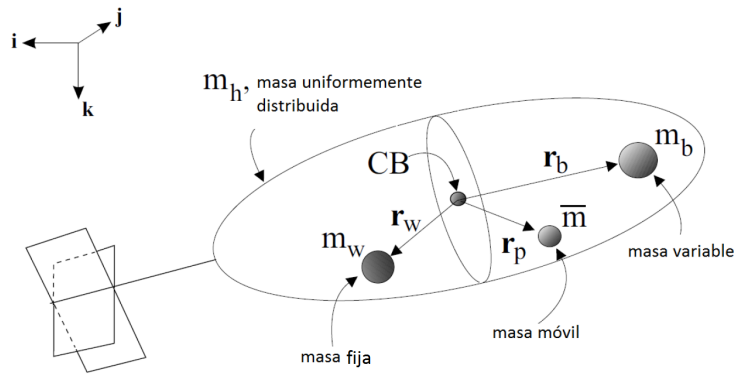


Figura 3.4: Diagrama de distribución de las masas del vehículo.

La masa total de vehículo es entonces,

$$m_v = m_h + m_w + m_b + \bar{m} = m_s + \bar{m} \quad (3.12)$$

Las posiciones, en el marco del cuerpo, de las masas m_b y m_w están dadas por los vectores \mathbf{r}_w y \mathbf{r}_b desde el CB hacia las masas respectivas. El vector $\mathbf{r}_p(\mathbf{t})$ describe la posición de la masa móvil \bar{m} en coordenadas del marco del cuerpo en el tiempo t .

La masa m_w y su posición pueden ser usadas para balancear el momento de cabeceo y alabeo del glider generados por las otras masas y definir la inercia del vehículo.

La masa del fluido desplazada por el vehículo es m . Se define la flotabilidad neta como

$m_0 = m_v - m$ tal que se hundirá (flotabilidad negativa) si m_0 es positiva y flotará (flotabilidad positiva) si m_0 es negativa.

\mathbf{J}_h denota la matriz de inercia, con respecto al marco del cuerpo, para la masa uniformemente distribuida del vehículo m_h . La matriz de inercia atribuida a la masa estacionaria en el marco del cuerpo es

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{J}_h - m_w \hat{\mathbf{r}}_w \hat{\mathbf{r}}_w - m_b \hat{\mathbf{r}}_b \hat{\mathbf{r}}_b \quad (3.13)$$

3.2.2. Control de las masas internas

Se aplican dos señales de control en un glider, la primera sobre la masa variable (m_b) de posición fija (\mathbf{r}_b) y la segunda sobre una masa de valor fijo (\bar{m}) pero posición variable (\mathbf{r}_p). La entrada de control (\dot{m}_b) especifica la tasa de cambio en la masa del lastre y la segunda entrada de control corresponde a la fuerza aplicada sobre la masa móvil.

El glider Spray funciona con dos masas móviles, una se desliza a lo largo del eje longitudinal y genera el movimiento de cabeceo (pitch θ), la segunda masa genera el movimiento de alabeo (roll ϕ).

3.2.3. Fuerzas de restauración: Flotabilidad y Gravedad

Como todo vehículo submarino, un glider está sometido a dos fuerzas, aquí definidas como *fuerzas de restauración*, éstas son: la fuerza de gravedad $m_v g$, que actúa en la dirección positiva de \mathbf{k} y en el centro de gravedad del vehículo CG [1]. El CG es el centroide del peso del vehículo. Su posición está dada por:

$$\mathbf{r}_{CG} = \frac{\int \mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) dV}{\int \rho(\mathbf{r}) dV} \quad (3.14)$$

Donde $\rho(\mathbf{r})$ es densidad, dV es el elemento de volumen y la integral se desarrolla sobre el

volumen del vehículo. Para las masas del glider definidas aquí,

$$\mathbf{r}_{CG} = \frac{\sum m_i \mathbf{r}_i}{\sum m_i} = \frac{m_h \mathbf{r}_h + m_w \mathbf{r}_w + m_b \mathbf{r}_b + \bar{m} \mathbf{r}_p}{m_h + m_w + m_b + \bar{m}} \quad (3.15)$$

Debido a que la masa del fuselaje se considera uniformemente distribuida, el centro de gravedad de la misma coincide con el CB del glider y por lo tanto $\mathbf{r}_h = 0$.

La fuerza de flotabilidad es consecuencia del desplazamiento del fluido por el volumen del vehículo determinada por el principio de Arquímedes. Esta fuerza resulta de la presión neta ejercida por el fluido sobre la superficie del vehículo. La flotabilidad neta actúa en el CB del glider y es $m_0 g = (m_v - m)g$, donde m_v es la masa del vehículo, m es la masa del fluido desplazado y g la masa del vehículo. Actúa en la dirección negativa de \mathbf{k} . De la ecuación (3.15) tenemos,

$$m_v \mathbf{r}_{CG} = m_w \mathbf{r}_w + m_b \mathbf{r}_b + \bar{m} \mathbf{r}_p \quad (3.16)$$

entonces el torque neto está dado por

$$\boldsymbol{\tau}_{gravity} = (\bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p + m_w \hat{\mathbf{r}}_p + m_b \hat{\mathbf{r}}_b) g (\mathbf{R}^T \mathbf{k}) \quad (3.17)$$

La estabilidad del glider depende de si CG está arriba (inestable) o por debajo (estable) del CB .

3.2.4. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones de movimiento se derivan del cálculo del momento de la energía total del sistema vehículo-fluido y aplicando las leyes de Newton [1].

Sea \mathbf{p} que representa el momento traslacional total del sistema vehículo-fluido y $\boldsymbol{\pi}$ el momento angular total del sistema sobre el origen del marco de referencia inercial, todo expresado con respecto al marco inercial. Sea \mathbf{p}_p el momento total de la masa puntual móvil \bar{m} con respecto al marco inercial, de forma similar \mathbf{p}_b y \mathbf{p}_w representan el momento de la masa del sistema de lastre m_b y de la masa puntual de compensación m_w también con respecto al marco inercial.

Las leyes de Newton resultantes son

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{p}} &= \sum_{i=1}^I \mathbf{f}_{ext_i}, \\
\dot{\boldsymbol{\pi}} &= \sum_{i=1}^I (\mathbf{x}_i \times \mathbf{f}_{ext_i}) + \sum_{j=1}^J \boldsymbol{\tau}_{ext_j}, \\
\dot{\mathbf{p}}_p &= \bar{m}g\mathbf{k} + \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{int_movil_k}, \\
\dot{\mathbf{p}}_b &= m_b g\mathbf{k} + \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{int_lastre_l}, \\
\dot{\mathbf{p}}_w &= m_w g\mathbf{k} + \sum_{n=1}^N \mathbf{f}_{int_fija_n}.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

donde $\vec{\mathbf{k}}$ es el vector unitario en la dirección de la gravedad, \mathbf{f}_{ext_i} es una fuerza externa aplicada al sistema y $\boldsymbol{\tau}$ es un par externo. El vector \mathbf{x}_i localiza el punto de aplicación de \mathbf{f}_{ext_i} con respecto al marco inercial. Estas fuerzas son debido a la gravedad y a la flotabilidad. La fuerza $\mathbf{f}_{int_movil_k}$ es una fuerza aplicada al vehículo en la masa puntual \bar{m} , esta puede ser como una fuerza de control. Las fuerzas $\mathbf{f}_{int_lastre_l}$ y $\mathbf{f}_{int_fija_n}$ son las fuerzas aplicadas a m_b y m_w . Debido a que estas masas tienen una posición fija, las fuerzas internas en ellas son consideradas como restricciones y no como controles.

Sea \mathbf{P} el momento (con respecto al marco inercial) en el sistema vehículo-fluido expresado en el marco del cuerpo. $\boldsymbol{\Pi}$ el momento angular sobre el origen del marco del cuerpo, también en coordenadas del cuerpo. Estos términos incluyen los momentos de las masas internas del vehículo. Sea \mathbf{P}_p el momento de la masa puntual expresado en el marco del cuerpo. \mathbf{P}_b y \mathbf{P}_w representan el momento de la masa de lastre y la masa de compensación en el marco del

cuerpo:

$$\begin{aligned}
\mathbf{p} &= \mathbf{R}\mathbf{P}, \\
\boldsymbol{\pi} &= \mathbf{R}\boldsymbol{\Pi} + \mathbf{b} \times \mathbf{p}, \\
\mathbf{p}_p &= \mathbf{R}\mathbf{P}_p, \\
\mathbf{p}_b &= \mathbf{R}\mathbf{P}_b, \\
\mathbf{p}_w &= \mathbf{R}\mathbf{P}_w.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Al diferenciar las ecuaciones 3.19 con respecto al tiempo y usando las expresiones cinemáticas 3.6 y 3.7 se obtiene:

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{R}(\dot{\mathbf{P}} + \widehat{\boldsymbol{\Omega}}\mathbf{P}), \\
\dot{\boldsymbol{\pi}} &= \mathbf{R}(\dot{\boldsymbol{\Pi}} + \widehat{\boldsymbol{\Omega}}\boldsymbol{\Pi}) + \mathbf{R}\mathbf{v} \times \mathbf{p} + \mathbf{b} \times \dot{\mathbf{p}}, \\
\dot{\mathbf{p}}_p &= \mathbf{R}(\dot{\mathbf{P}}_p + \widehat{\boldsymbol{\Omega}}\mathbf{P}_p), \\
\dot{\mathbf{p}}_b &= \mathbf{R}(\dot{\mathbf{P}}_b + \widehat{\boldsymbol{\Omega}}\mathbf{P}_b), \\
\dot{\mathbf{p}}_w &= \mathbf{R}(\dot{\mathbf{P}}_w + \widehat{\boldsymbol{\Omega}}\mathbf{P}_w).
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Al sustituir (3.18) en (3.20) para la tasa de cambio de momento inercial, se obtienen las siguientes ecuaciones dinámicas expresadas en coordenadas del cuerpo:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{R}^T \sum_{i=1}^I \mathbf{f}_{ext_i}, \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{\Pi}} &= \boldsymbol{\Pi} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{v} \\
&+ \mathbf{R}^T \left(\sum_{i=1}^I (\mathbf{x}_i - \mathbf{b}) \times \mathbf{f}_{ext_i} \right) + \mathbf{R}^T \sum_{j=1}^J \boldsymbol{\tau}_{ext_j},
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\dot{\mathbf{P}}_p = \mathbf{P}_p \times \boldsymbol{\Omega} + \bar{m}g(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{int_movil_k}, \tag{3.23}$$

$$\dot{\mathbf{P}}_b = \mathbf{P}_b \times \boldsymbol{\Omega} + \bar{m}_bg(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{int_lastrel_l}, \tag{3.24}$$

$$\dot{\mathbf{P}}_w = \mathbf{P}_w \times \boldsymbol{\Omega} + \bar{m}_wg(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{n=1}^N \mathbf{f}_{int_fija_n}, \tag{3.25}$$

donde $\mathbf{R}^T \mathbf{k} + \mathbf{R}^T \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{int_movil_k}$ es la fuerza actuando sobre el punto de masa \bar{m} en coordenadas del cuerpo. Entonces,

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_p \times \boldsymbol{\Omega} + \bar{m}g(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{int_movil_k} \quad (3.26)$$

y

$$\dot{\mathbf{P}}_p = \bar{\mathbf{u}}$$

Podemos ver que $\bar{\mathbf{u}}$ no es una fuerza interna en la masa puntual porque las fuerzas centrífugas y gravitacionales en \bar{m} están incluidas en la expresión para $\bar{\mathbf{u}}$. De la misma forma, sea

$$\mathbf{u}_b = \begin{pmatrix} u_{b1} \\ u_{b2} \\ u_{b3} \end{pmatrix} = \mathbf{P}_b \times \boldsymbol{\Omega} + m_b g(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{int_lastre_l} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{u}_w = \begin{pmatrix} u_{w1} \\ u_{w2} \\ u_{w3} \end{pmatrix} = \mathbf{P}_w \times \boldsymbol{\Omega} + m_w g(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) + \mathbf{R}^T \sum_{n=1}^N \mathbf{f}_{int_fija_n} \quad (3.28)$$

entonces $\dot{\mathbf{P}}_b = \mathbf{u}_b$ y $\dot{\mathbf{P}}_w = \mathbf{u}_w$.

Las fuerzas hidrodinámicas viscosas y los pares en el submarino, incluidas en $\sum_{i=1}^I \mathbf{f}_{ext_i}$ y $\sum_{j=1}^J \boldsymbol{\tau}_{ext_j}$, dependen de los estados \mathbf{v} y $\boldsymbol{\Omega}$. Para encontrar las ecuaciones de movimiento con respecto a estos estados se determina la energía cinética total del sistema vehículo-fluido. La energía cinética T_s de un cuerpo rígido con una masa total m_s , la posición de CG es \mathbf{r}_s en el

marco del cuerpo (igual a \mathbf{r}_{CG}) y la matriz de inercia \mathbf{J}_s es

$$T_s = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_s \mathcal{I} & -m_s \hat{\mathbf{r}}_s \\ m_s \hat{\mathbf{r}}_s & \mathbf{J}_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

donde \mathcal{I} es una matriz identidad de 3×3 .

Sea \mathbf{v}_p la velocidad absoluta de la masa puntual móvil \bar{m} expresada en coordenadas del cuerpo, podemos expresar:

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{v} + \dot{\mathbf{r}}_p + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p \quad (3.30)$$

La energía cinética T_p en la masa móvil se calcula y es expresada de la siguiente manera:

$$T_p = \frac{1}{2} \bar{m} \|\mathbf{v}_p\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{m} \mathcal{I} & -\bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p & \bar{m} \mathcal{I} \\ \bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p & -\bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p \hat{\mathbf{r}}_p & \bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p \\ \bar{m} \mathcal{I} & -\bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p & \bar{m} \mathcal{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

Las energías cinéticas en el lastre y la masa de compensación son calculadas de la misma forma. Siendo \mathbf{v}_b y \mathbf{v}_w la velocidad absoluta de la masa m_b y m_w , respectivamente, expresada en coordenadas del cuerpo. Su energía cinética es entonces,

$$T_b = \frac{1}{2} m_b \|\mathbf{v}_b\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_b \mathcal{I} & -m_b \hat{\mathbf{r}}_b & m_b \mathcal{I} \\ m_b \hat{\mathbf{r}}_b & -m_b \hat{\mathbf{r}}_b \hat{\mathbf{r}}_b & m_b \hat{\mathbf{r}}_b \\ m_b \mathcal{I} & -m_b \hat{\mathbf{r}}_b & m_b \mathcal{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_b \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

$$T_w = \frac{1}{2} m_w \|\mathbf{v}_w\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_w \mathcal{I} & -m_w \hat{\mathbf{r}}_w & m_w \mathcal{I} \\ m_w \hat{\mathbf{r}}_w & -m_w \hat{\mathbf{r}}_w \hat{\mathbf{r}}_w & m_w \hat{\mathbf{r}}_w \\ m_w \mathcal{I} & -m_w \hat{\mathbf{r}}_w & m_w \mathcal{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Kirchhoff muestra que la energía cinética de un volumen sin límite de un fluido ideal debido al movimiento de cuerpo rígido sumergido toma la forma,

$$T_f = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_f & \mathbf{D}_f^T \\ \mathbf{D}_f & \mathbf{J}_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix}$$

donde \mathbf{M}_f es la matriz de masa agregada, \mathbf{J}_f es la matriz de inercia agregada y \mathbf{D}_f es un término añadido cruzado. Estas matrices dependen de la forma externa del cuerpo y de la densidad del fluido. El fluido se asume incompresible, no rota y no tiene movimiento en el infinito.

Los efectos viscosos tales como la sustentación y el arrastre pueden ser incluidos en el modelo como fuerzas y pares externos.

La energía cinética total del sistema vehículo-fluido es $T = T_s + T_p + T_f + T_b + T_w$ o bien,

$$T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \\ \dot{\mathbf{r}}_b \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} \mathbf{I} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \\ \dot{\mathbf{r}}_b \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

donde

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} (m_s + \bar{m})\mathcal{I} + \mathbf{M}_f & -\bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p - m_b\hat{\mathbf{r}}_b - m_w\hat{\mathbf{r}}_w + \mathbf{D}_f^T & \bar{m}\mathcal{I} & m_b\mathcal{I} & m_w\mathcal{I} \\ \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p + m_b\hat{\mathbf{r}}_b + m_w\hat{\mathbf{r}}_w + \mathbf{D}_f^T & \mathbf{J}_h - \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p\hat{\mathbf{r}}_p - m_b\hat{\mathbf{r}}_b\hat{\mathbf{r}}_b - m_w\hat{\mathbf{r}}_w\hat{\mathbf{r}}_w + \mathbf{J}_f & \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p & m_b\hat{\mathbf{r}}_b & m_w\hat{\mathbf{r}}_w \\ \bar{m}\mathcal{I} & -\bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p & \bar{m}\mathcal{I} & 0 & 0 \\ m_b\mathcal{I} & -m_b\hat{\mathbf{r}}_b & 0 & m_b\mathcal{I} & 0 \\ m_w\mathcal{I} & -m_w\hat{\mathbf{r}}_w & 0 & 0 & m_w\mathcal{I} \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Es posible calcular el momento como

$$\begin{aligned} \mathbf{P} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{v}} &= (m_s \mathcal{I} + \mathbf{M}_f) \mathbf{v} + \mathbf{D}_f^T \boldsymbol{\Omega} + \bar{m}(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p + \dot{\mathbf{r}}_p) \\ &\quad + m_b(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_b + \dot{\mathbf{r}}_b) + m_w(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_w + \dot{\mathbf{r}}_w), \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Pi} = \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} &= \mathbf{D}_f \mathbf{v} + (\mathbf{J}_h + \mathbf{J}_f) \boldsymbol{\Omega} + \bar{m} \hat{\mathbf{r}}_p (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p + \dot{\mathbf{r}}_p) \\ &\quad + m_b \hat{\mathbf{r}}_b (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_b + \dot{\mathbf{r}}_b) + m_w \hat{\mathbf{r}}_w (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_w + \dot{\mathbf{r}}_w), \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\mathbf{P}_p = \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{r}}_p} = \bar{m}(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p + \dot{\mathbf{r}}_p), \quad (3.38)$$

$$\mathbf{P}_b = \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{r}}_b} = m_b(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_b + \dot{\mathbf{r}}_b), \quad (3.39)$$

$$\mathbf{P}_w = \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{r}}_w} = m_w(\mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_w + \dot{\mathbf{r}}_w). \quad (3.40)$$

Considere el caso donde la geometría del vehículo lleva a que las matrices de masa agregada e inercia resultan matrices diagonales. Esto ocurre cuando el vehículo tiene tres ejes de simetría. Esta condición se cumple por ejemplo en un vehículo cuya forma sea la de un elipsoide o quizá una forma más compleja pero con las alas montadas simétricamente. Entonces \mathbf{M}_f y \mathbf{J}_f son diagonales y $\mathbf{D}_f = 0$. Entonces, sea $\mathbf{M}_f = \text{diag}(m_{f1}, m_{f2}, m_{f3})$ y $\mathbf{J}_f = \text{diag}(J_{f1}, J_{f2}, J_{f3})$. Se define,

$$\mathbf{M} = m_h \mathcal{I} + \mathbf{M}_f, \quad (3.41)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_h = +\mathbf{J}_f \quad (3.42)$$

donde \mathcal{I} es la matriz identidad de 3×3 . Entonces,

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \boldsymbol{\Pi} \\ \mathbf{P}_p \\ \mathbf{P}_b \\ \mathbf{P}_w \end{pmatrix} = \mathbf{I} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \\ \dot{\mathbf{r}}_b \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

donde

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} \mathbf{M} + (\bar{m} + m_b + m_w)\mathcal{I} & -\bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p - m_b\hat{\mathbf{r}}_b - m_w\hat{\mathbf{r}}_w & \bar{m}\mathcal{I} & m_b\mathcal{I} & m_w\mathcal{I} \\ \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p + m_b\hat{\mathbf{r}}_b + m_w\hat{\mathbf{r}}_w & \mathbf{J} - \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p\hat{\mathbf{r}}_p - m_b\hat{\mathbf{r}}_b\hat{\mathbf{r}}_b - m_w\hat{\mathbf{r}}_w\hat{\mathbf{r}}_w & \bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p & m_b\hat{\mathbf{r}}_b & m_w\hat{\mathbf{r}}_w \\ \bar{m}\mathcal{I} & -\bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p & \bar{m}\mathcal{I} & 0 & 0 \\ m_b\mathcal{I} & -m_b\hat{\mathbf{r}}_b & 0 & m_b\mathcal{I} & 0 \\ m_w\mathcal{I} & -m_w\hat{\mathbf{r}}_w & 0 & 0 & m_w\mathcal{I} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Al invertir las relaciones existentes de (3.43) se obtienen las velocidades del cuerpo en término del momento:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \Omega \\ \dot{\mathbf{r}}_p \\ \dot{\mathbf{r}}_b \\ \dot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} = \mathbf{I}^{-1} \begin{pmatrix} P \\ \Pi \\ P_p \\ P_b \\ P_w \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{I}^{-1} = \begin{pmatrix} M^{-1} & 0 & -M^{-1} & -M^{-1} & -M^{-1} \\ 0 & J^{-1} & -J^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p & -J^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b & -J^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w \\ -M^{-1} & \hat{\mathbf{r}}_p J^{-1} & I^{-1}_{(3,3)} & I^{-1}_{(3,4)} & I^{-1}_{(3,5)} \\ -M^{-1} & \hat{\mathbf{r}}_b J^{-1} & I^{-1}_{(4,3)} & I^{-1}_{(4,4)} & I^{-1}_{(4,5)} \\ -M^{-1} & \hat{\mathbf{r}}_w J^{-1} & I^{-1}_{(5,3)} & I^{-1}_{(5,4)} & I^{-1}_{(5,5)} \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

donde

$$\begin{aligned}
I^{-1}_{(3,3)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_p \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_p + \frac{1}{\bar{m}} \mathcal{I}, \\
I^{-1}_{(3,4)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_p \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_b, \\
I^{-1}_{(3,5)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_p \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_w, \\
I^{-1}_{(4,3)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_b \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_p, \\
I^{-1}_{(4,4)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_b \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_b + \frac{1}{m_b} \mathcal{I}, \\
I^{-1}_{(4,5)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_b \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_w, \\
I^{-1}_{(5,3)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_w \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_p, \\
I^{-1}_{(5,4)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_w \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_b, \\
I^{-1}_{(5,5)} &= M^{-1} - \hat{\mathbf{r}}_w \mathbf{J}^{-1} \hat{\mathbf{r}}_w + \frac{1}{m_w} \mathcal{I}.
\end{aligned}$$

Para obtener las ecuaciones de movimiento en términos de la velocidad del cuerpo, se deriva (3.45) con respecto al tiempo. Esta operación introduce términos relacionados con la tasa de cambio en la masa del lastre (\dot{m}_b). Se asume que el lastre se llena de tal manera que cualquier momento asociado con esta acción se desprecia. Por lo tanto el término \dot{m}_b se omite de las siguientes ecuaciones.

En los gliders oceanográficos existentes la masa del lastre es muy pequeña en comparación con la masa total del vehículo. El bombeo en el lastre ocurre en intervalos específicos, por ejemplo durante la transición, por lo tanto \dot{m}_b es igual a cero la mayoría del tiempo y no afecta durante las trayectorias de planeación estable.

Derivando (3.45) tenemos:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \\ \ddot{\mathbf{r}}_p \\ \ddot{\mathbf{r}}_b \\ \ddot{\mathbf{r}}_w \end{pmatrix} = I^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{P}} \\ \dot{\boldsymbol{\Pi}} \\ \dot{\mathbf{P}}_p \\ \dot{\mathbf{P}}_b \\ \dot{\mathbf{P}}_w \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} (I^{-1}) \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \boldsymbol{\Pi} \\ \mathbf{P}_p \\ \mathbf{P}_b \\ \mathbf{P}_w \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

donde

$$\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p & -\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b & -\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w \\ 0 & \hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,3)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,4)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,5)} \\ 0 & \hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,3)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,4)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,5)} \\ 0 & \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,3)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,4)} & \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,5)} \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

dato que $\frac{d}{dt}\mathbf{M}^{-1} = 0$, $\frac{d}{dt}\mathbf{J}^{-1} = 0$, y

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,3)} &= -\hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p - \hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,4)} &= -\hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b - \hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(3,5)} &= -\hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w - \hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,3)} &= -\hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p - \hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,4)} &= -\hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b - \hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(4,5)} &= -\hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w - \hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,3)} &= -\hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p - \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_p, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,4)} &= -\hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b - \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_b, \\ \frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}_{(5,5)} &= -\hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w - \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{J}^{-1}\hat{\mathbf{r}}_w, \end{aligned}$$

Los términos de $\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(i, j)$ son términos generalmente pequeños en submarinos existentes de este tipo. $\hat{\mathbf{r}}_b$ y $\hat{\mathbf{r}}_w$ son cero. $\hat{\mathbf{r}}_p$ es cero en el equilibrio y muy pequeño durante las transiciones. Las magnitudes de los elementos de \mathbf{J} son generalmente grandes comparados con los elementos de \mathbf{r}_p , \mathbf{r}_b y \mathbf{r}_w . Con la sustitución en (3.47) de las ecuaciones (3.25) y (3.26) para las derivadas $\dot{\mathbf{P}}$, $\dot{\mathbf{\Pi}}$, $\dot{\mathbf{P}}_p$, $\dot{\mathbf{P}}_b$, $\dot{\mathbf{P}}_w$ y de (3.48) para $\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}$ y de (3.43) para las relaciones entre momento y velocidad, las ecuaciones completas de movimiento para el vehículo en un espacio tridimensional son:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{b}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \\ \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\mathbf{r}}_p \\ \dot{\mathbf{r}}_b \\ \dot{\mathbf{r}}_w \\ \dot{\mathbf{P}}_p \\ \dot{\mathbf{P}}_b \\ \dot{\mathbf{P}}_w \\ \dot{m}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\Omega}} \\ \mathbf{R}\mathbf{v} \\ \mathbf{J}^{-1}\bar{\mathbf{T}} \\ \mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{F}} \\ \frac{1}{\bar{m}}\mathbf{P}_p - \mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p \\ \frac{1}{m_b}\mathbf{P}_b - \mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_b \\ \frac{1}{m_w}\mathbf{P}_w - \mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_w \\ \bar{\mathbf{u}} \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_w \\ u_{\text{cambio_lastre}} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

donde

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{T}} &= (\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} + \hat{\mathbf{r}}_p\mathbf{P}_p + \hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{P}_b + \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{P}_w) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{v}) \\
&+ (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p) \times \mathbf{P}_p + (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_b) \times \mathbf{P}_b + (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_w) \times \mathbf{P}_w + (\bar{m}\hat{\mathbf{r}}_p + m_b\hat{\mathbf{r}}_b + m_w\hat{\mathbf{r}}_w)g\mathbf{R}^T\mathbf{k} \\
&+ \mathbf{T}_{ext} - \hat{\mathbf{r}}_p\bar{\mathbf{u}} - (\hat{\mathbf{r}}_b\mathbf{u}_b + \hat{\mathbf{r}}_w\mathbf{u}_w) \\
\bar{\mathbf{F}} &= (\mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{P}_p + \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_w) \times \boldsymbol{\Omega} + m_0g\mathbf{R}^T\mathbf{k} + \mathbf{F}_{ext} - \bar{\mathbf{u}} - (\mathbf{u}_b + \mathbf{u}_w).
\end{aligned}$$

Entonces,

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_{ext} &= \mathbf{R}^T \sum \mathbf{f}_{ext_i} \\
\mathbf{T}_{ext} &= \mathbf{R}^T \sum (\mathbf{x}_i - \mathbf{b}) \times \mathbf{f}_{ext_i} + \mathbf{R}^T \sum \boldsymbol{\tau}_{ext_i},
\end{aligned} \quad (3.50)$$

donde \mathbf{x}_i es el punto en el marco inercial donde \mathbf{f}_{ext_i} actúa, representa las fuerzas externas y sus momentos incluyendo sustentación, arrastre y los momentos hidrodinámicos asociados con respecto al marco del cuerpo. $\bar{\mathbf{u}}$ es un control aplicado a \bar{m} , y \mathbf{u}_b y \mathbf{u}_w son las fuerzas en las masas m_b y m_w . Son consideradas como fuerzas restrictivas cuando estas masas están fijas en algún lugar del vehículo.

3.2.5. Términos hidrodinámicos del modelo: Arrastre, Sustentación y Momento

En esta sección se introducen los términos hidrodinámicos en las ecuaciones de movimiento del glider [1]. En la subsección anterior aparecen los términos denominados como \mathbf{F}_{ext} y \mathbf{T}_{ext} , en ellos se incluyen las fuerzas y momentos hidrodinámicos debido al movimiento del vehículo en el agua. Dichos momentos y fuerzas se producen debido a los efectos viscosos y no viscosos en el fluido. Los efectos inestables de un vehículo a través de un fluido son extremadamente difíciles de entender y modelar, pero es necesario generar un modelo de complejidad manejable, y que además, exprese las fuerzas hidrodinámicas en el glider de forma representativa. Estos términos hidrodinámicos se expresan en el marco de la corriente como arrastre (drag), sustentación (lift) y fuerza lateral (sideforce), también los momentos hidrodinámicos son expresados en el marco de la corriente y se representan como:

$$\mathbf{F}_{hidro} = \begin{pmatrix} -D \\ SF \\ -L \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_{hidro} = \begin{pmatrix} M_{DL1} \\ M_{DL2} \\ M_{DL3} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

donde D , L , SF son arrastre, sustentación y fuerza lateral, respectivamente, M_{DLi} representa el momento hidrodinámico alrededor del i -ésimo eje del marco de corriente. Determinar funciones que representen estas fuerzas es una tarea complicada, puesto que éstas dependen de factores como la geometría del vehículo, velocidad, aceleración, ángulos y respectivas velocidades angulares, un modelo semiestable tomaría la forma:

$$\mathbf{F}_{hidro} = \begin{pmatrix} -D \\ SF \\ -L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_D(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \\ \frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{SF}(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \\ -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_L(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

C_D , C_{SF} , C_L son los coeficientes de arrastre, fuerza lateral y sustentación. La cantidad $\frac{1}{2}\rho V_r^2$ es la dinámica de la presión. A es el área característica del vehículo en el cual los coeficientes están definidos. α y β son los ángulos aerodinámicos. $\boldsymbol{\delta}_{cs}$ es el vector de la

configuración de la superficie de control y Re es el número de Reynolds del fluido sobre el vehículo. La amortiguación de rotación puede ser incluida en el modelo, y puede ser modelada como lineal o cuadrática con respecto a la velocidad rotacional Ω . El modelo para los momentos hidrodinámicos en el vehículo entonces toma la forma:

$$\mathbf{M}_{hidro} = \begin{pmatrix} M_{DL1} \\ M_{DL2} \\ M_{DL3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M1}(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \\ \frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M2}(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \\ -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M3}(\alpha, \beta, \boldsymbol{\delta}_{cs}), Re \end{pmatrix} + \mathbf{K}_{\Omega^1}\Omega + \Omega\mathbf{K}_{\Omega^2}\Omega \quad (3.53)$$

C_{M1} , C_{M2} , C_{M3} son los coeficientes de momentos hidrodinámicos alrededor de los ejes 1, 2 y 3 del viento. Mientras que \mathbf{K}_{Ω^1} y \mathbf{K}_{Ω^2} son las matrices de la amortiguación de rotación para términos lineales y cuadráticos respectivamente. Como primera aproximación se pueden modelar como diagonales. Se debe notar que estas fuerzas y momentos son escritos sobre el centro del marco del viento, que también corresponde al centro del marco del cuerpo.

3.2.6. Modelo en el plano vertical-longitudinal

En esta sección se reducen las ecuaciones de movimiento tridimensional al plano vertical, con el propósito de simular este modelo simplificado aplicando control en la masa móvil y la cantidad de agua en el lastre. Esta simulación y sus resultados marcan las expectativas de compartamiento del prototipo experimental, y serán presentados en el capítulo 5 y 6. Para alcanzar la simplificación del modelo, como primer paso se restringe el arreglo de las masas internas. La masa de compensación se elimina, $m_w = 0$. El lastre se fija en el CB del vehículo, $\mathbf{r}_b = 0$. Este cambio logrará eliminar el acoplamiento inercial debido a la masa de compensación, además de eliminar el acoplamiento entre la cantidad de agua en el lastre, la inercia del vehículo y el momento de cabeceo (pitch).

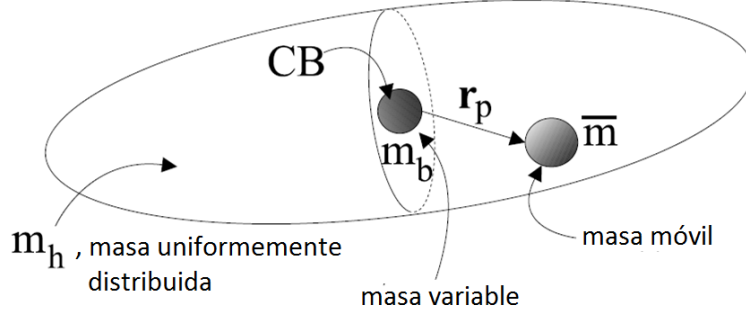


Figura 3.5: Diagrama de distribución de las masas simplificadas.

En este modelo reducido la masa móvil actúa sobre la orientación del glider, y el lastre tiene efecto solo en la flotabilidad del mismo. El plano vertical- longitudinal se conforma por el plano $i - k$ en coordenadas inerciales y el plano $e_1 - e_3$ en coordenadas del cuerpo. De acuerdo a esto tenemos que,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ z \end{pmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \\ v_3 \end{pmatrix}; \quad \boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ \Omega_2 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{r}_p = \begin{pmatrix} r_{p1} \\ 0 \\ r_{p3} \end{pmatrix} \\
 \mathbf{r}_p &= \begin{pmatrix} r_{p1} \\ 0 \\ r_{p3} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{P}_p = \begin{pmatrix} P_{p1} \\ 0 \\ P_{p3} \end{pmatrix}; \quad \bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \\ u_3 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

La masa móvil se desplaza paralela al eje longitudinal del glider e_1 , es decir, se fija en r_{p3} y por lo tanto $\dot{r}_{p3} = 0$. \mathbf{P}_p representa el momento lineal de la masa móvil y esta dado por $\mathbf{P}_p = \bar{m}(\mathbf{v} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_p + \dot{\mathbf{r}}_p)$, al realizar estas operaciones se obtiene que,

$$P_{p3} = \bar{m}(v_3 - r_{p1}\Omega_2) \tag{3.55}$$

Al derivar (3.55) con respecto del tiempo y reemplazarla por u_3 , las ecuaciones de movimiento

(3.49) reducidas al plano vertical son

$$\dot{x} = v_1 \cos \theta + v_3 \sin \theta \quad (3.56)$$

$$\dot{z} = v_3 \sin \theta - v_1 \cos \theta \quad (3.57)$$

$$\dot{\theta} = \Omega_2 \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}_2 = \frac{1}{a} & (\bar{m}r_{p1}(P_{p1}\Omega_2 - L \cos \alpha - D \sin \alpha + \bar{m}\Omega_2\dot{r}_{p1} + m_1\Omega_2v_1) - (m_3 + \bar{m}) \\ & - (r_{p3}u_1 + P_{p1}\Omega_2r_{p1} + v_1v_3(m_1 - m_3) + g\bar{m}(r_{p1} \cos \theta + r_{p3} \sin \theta) \\ & + \bar{m}\Omega_2r_{p1}\dot{r}_{p1} + \bar{m}\Omega_2r_{p3}v_3 - \bar{m}(\Omega_2^2)r_{p1}r_{p3} - M_{DL}) + gm_0 \cos \theta) \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} (-m_3v_3\Omega_2 - m_0g \sin \theta + L \sin \alpha - u_1 - P_{p3}\Omega_2 - D \cos \alpha) \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_3 = \frac{1}{a} & ((\bar{m}r_{p1}^2 + J_2)(P_{p1}\Omega_2 - L \cos \alpha - D \sin \alpha + gm_0 \cos \theta + \bar{m}\Omega_2\dot{r}_{p1} \\ & + m_1\Omega_2v_1) + v_1v_3(m_1 - m_3) - \bar{m}r_{p1}(r_{p3}u_1 - M_{DL} + P_{p1}\Omega_2r_{p1} \\ & + g\bar{m}(r_{p1} \cos \theta + r_{p3} \sin \theta) + \bar{m}\Omega_2r_{p1}\dot{r}_{p1} + \bar{m}\Omega_2r_{p3}v_3 - \bar{m}\Omega_2^2r_{p1}r_{p3})) \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\dot{r}_{p1} = \frac{P_{p1}}{\bar{m}} - \Omega_2r_{p3} - v_1 \quad (3.62)$$

$$\dot{r}_{p3} = \frac{P_{p3}}{\bar{m}} + \Omega_2r_{p1} - v_3 \quad (3.63)$$

$$\dot{P}_{p1} = u_1 \quad (3.64)$$

$$\dot{m}_b = u_4 \quad (3.65)$$

$$a = m_3\bar{m}r_{p1}^2 + J_2m_3 + J_2\bar{m}$$

En la figura 3.6 se muestran los términos hidrodinámicos y ángulos concernientes al plano vertical.

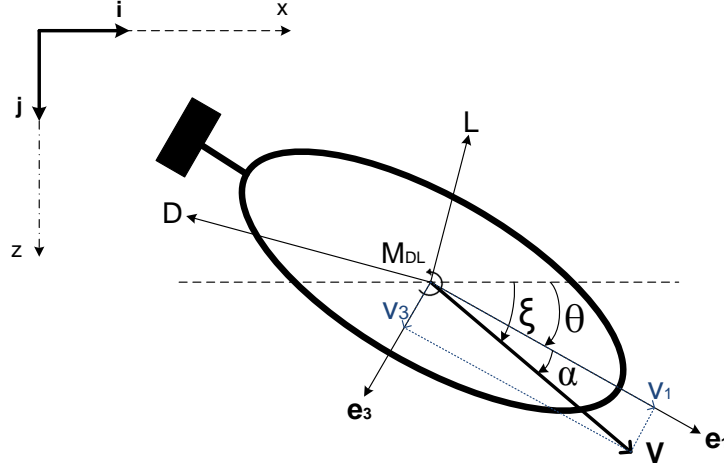


Figura 3.6: Definición de ángulos, fuerzas y momentos hidrodinámicos en el plano vertical.

El ángulo de trayectoria se denota como

$$\xi = \theta - \alpha$$

y la velocidad del vehículo por

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_3^2}$$

Las fuerzas hidrodinámicas y momento son expresadas en [?] como:

$$D = \frac{1}{2}\rho C_D(\alpha)AV^2 \approx (K_{D0} + K_D\alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (3.66)$$

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L(\alpha)AV^2 \approx (K_{L0} + K_L\alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (3.67)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2}\rho C_M(\alpha)AV^2 \approx (K_{M0} + K_M\alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (3.68)$$

Donde ρ , A y V representan la densidad del fluido, máxima área transversal del vehículo y su velocidad de desplazamiento, respectivamente. Además, los parámetros C_D , C_L y C_M representan funciones hidrodinámicas de las fuerzas de arrastre, sustentación y momento, respectivamente. Debido a la complejidad de cálculo de estas funciones, en [?] se utilizaron funciones menos complejas y aproximadamente iguales que incluyen K's como parámetros hidrodinámicos constantes.

IMPLEMENTACIÓN DEL GLIDER HÍBRIDO KAY JUUL H

El diseño del prototipo académico Kay Juul H (H de Híbrido) comenzó con un trabajo de maestría anterior a este [16], con un glider normal llamado Glider Kay Juul (pez dardo en Maya), se trataba de un glider normal en el cual se controló el ángulo de inclinación pitch θ controlando la posición de la masa móvil, la figura 4.1 muestra el diseño CAD de Kay Juul[16]. De Kay Juul se tomó la estructura o cuerpo de acrílico y se le agregó; un sistema de control de ángulo de pitch mejorado y un sistema de control de roll ϕ y un propulsor, convirtiéndolo con esta última variación en un Glider Híbrido (Kay Juul H).

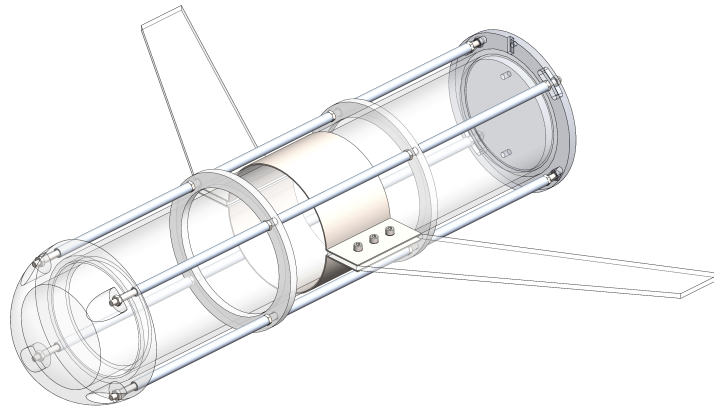


Figura 4.1: Glider Kay Juul.

Fue necesario realizar diseños mecánicos de un sistema que permitiera tener dos movimientos para poder controlar el ángulo de Pitch, Roll y un propulsor para convertirlo en Glider Híbrido, dentro de estos diseños se encuentra un rack de componentes excéntrico y una masa móvil de 2 kg, dentro de este mismo encontramos los siguientes componentes:

- Actuador lineal para efecto de la masa móvil
- Sistema de lastre.
- Electrónica (drivers, tarjeta de control, reguladores de voltaje).
- Sensores (humedad, análogos, inclinación).
- Sistema de engranes para giro de Roll.

En la siguiente figura podemos ver el prototipo Kay Juul H en su diseño mecánico y el rack de componentes que lo integran en su interior, así mismo podemos ver el diseño de la implementación del propulsor en la parte posterior del prototipo. En su exterior contamos con un sensor de presión, el cual nos indicara la profundidad en la cual se encuentra el prototipo.

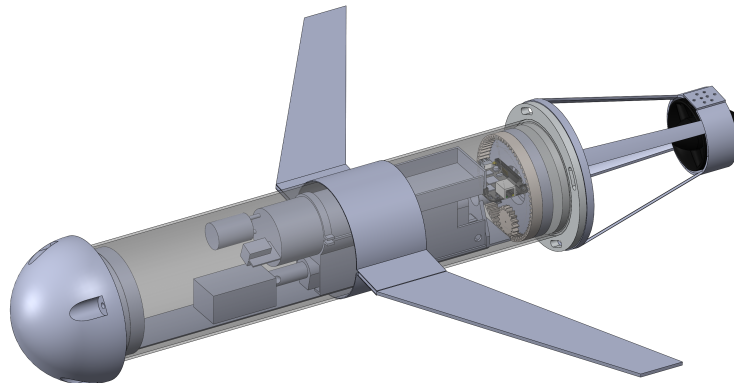


Figura 4.2: Glider Kay Juul H.

4.1. Consideraciones mecánicas

4.1.1. Mecanismo de Roll

En las consideraciones mecánicas para el sistema de engranes en el mecanismo de roll, se usa el movimiento de una masa excéntrica para lograr la inclinación del vehículo mediante un piñón y un engrane recto. Comenzamos ajustando el diámetro mayor que podemos tener

el cual está delimitado por el cilindro de acrílico del cuerpo del Glider(13.8 cm) dando una oportunidad de crear un engrane de $N=65$ y un piñon de $N=23$.

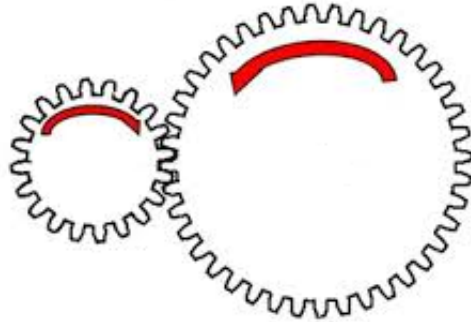


Figura 4.3: Engranajes mecanismo Roll.

El piñón se fija directamente a un servomotor el cual tiene un torque de operación de 3.3 kg/cm y 43 rpm, realizando la relación de engranes tenemos un torque de salida en el engrane mayor de 9.3 Kg/cm y 15 rpm. Como podemos ver este sistema nos quita velocidad pero nos da una mayor fuerza, para esta aplicación suficiente dicha velocidad. El mecanismo de engranes se encuentra de color rojo en la Figura 4.4.

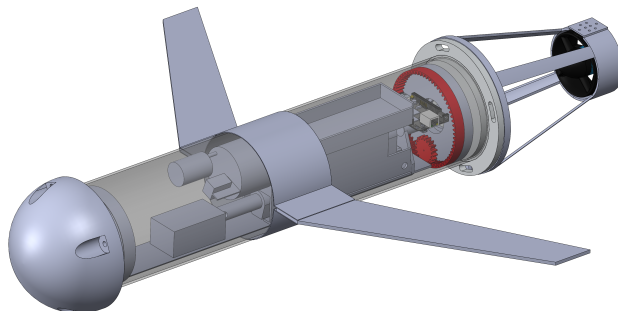


Figura 4.4: Ubicación mecanismo Roll.

4.1.2. Mecanismo de Pitch

Dentro de las consideraciones mecánicas del sistema de pitch encontramos una masa de 2 kg adaptada en la punta de un actuador lineal de carrera de 4 in, dentro de sus especificaciones

de este tenemos que con carga la fuerza de arrastre máxima de este actuador es de 110 lb (50 kg) con una velocidad de 0.5 in/seg (1.3 cm/seg). Este sistema se encuentra en la parte roja de la Figura 4.5.

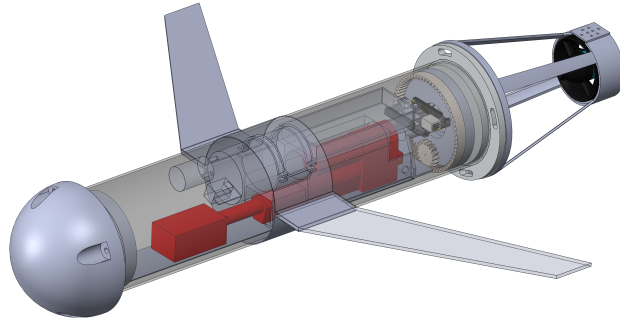


Figura 4.5: Ubicación mecanismo Pitch.

Este movimiento de masa provoca la inclinación deseada en Pitch, el control manda la señal al actuador para que este se ubique en una posición en la cual provoque la inclinación deseada. La sujeción de este actuador es mediante el soporte de las baterías que se encuentra atornillado al soporte excéntrico principal.

4.1.3. Sistema lastre

El lastre utilizado es el 1588-EA-12 de la marca Engel, se trata de un tanque tipo jeringa cuyo émbolo está acoplado a un tornillo sin fin, que a su vez se encuentra acoplado a un sistema de engranes movidos por un motor de corriente directa de 12 Vdc. En la Figura 4.6 es posible observar el diseño físico. Para este caso el saber que capacidad tenía el lastre se diseñó un sistema de acople con una reducción de engranes reduciendo de 68 vueltas a 15 vueltas para ser acoplado a un potenciómetro y tener una lectura analoga de su posición o de su capacidad del mismo; esto fue posible utilizando una impresión en material PLA con la impresora 3D.



Figura 4.6: Tanque de lastre, marca Engel con capacidad de 250 ml.

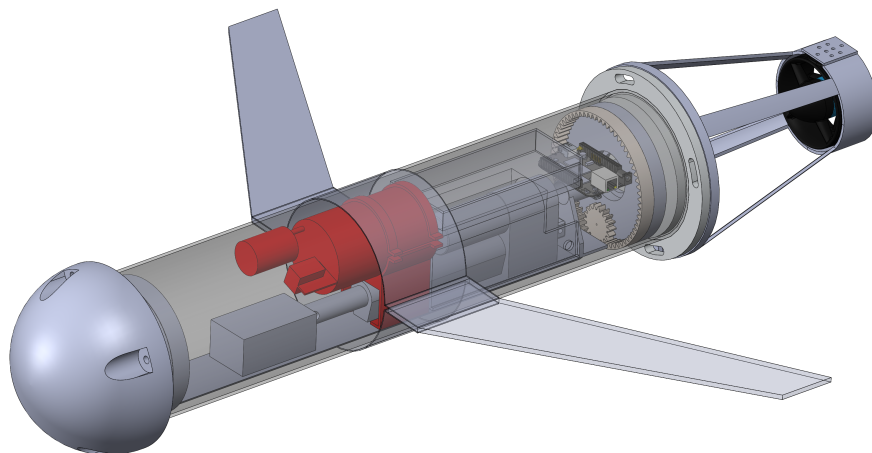


Figura 4.7: Ubicación de sistema lastre.

4.1.4. Soportes

Dentro de estas consideraciones mecánicas se diseñaron y construyeron los soportes del propulsor con una impresora 3D de material PLA (ácido poli-láctico) con efecto de reducir costos, versatilidad y accesibilidad. Se utilizó esta misma impresora para los demás soportes: como el de las baterías, el sistema de lastre, tapas céntricas y engranes. A continuación se muestran en la Figura 4.8 en color rojo todos los soportes diseñados y fabricados en CIDESI.

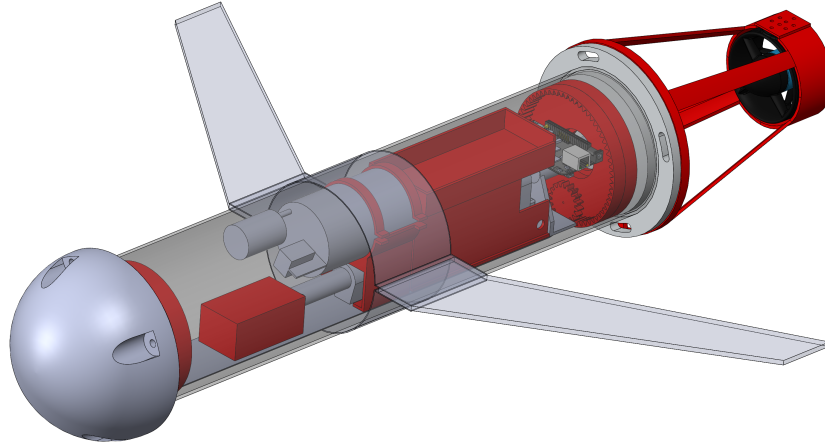


Figura 4.8: Soportes.

4.2. Arquitectura electrónica

Dentro de la arquitectura electrónica (Figura 4.9) tenemos el sistema de alimentación por una batería de 12 Vdc con 8000 Ah posterior a esta se encuentra un switch general para prender y apagar todo el prototipo, drivers para los motores y actuadores. Finalmente la tarjeta de control (Beaglebone Black) una computadora embebida con sistema operativo Linux, para nuestro caso la tarjeta es programada mediante lenguaje C con ayuda del software Eclipse.

El sistema tiene un consumo aproximado de 4 a 5 Amp, esto es durante el uso simultaneo de los motores, una vez que el vehículo encuentra estabilidad en el control su consumo se reduce a 1 Amp aproximadamente. Una aproximación de la duración de las baterías sería entre 4 a 6 hrs.

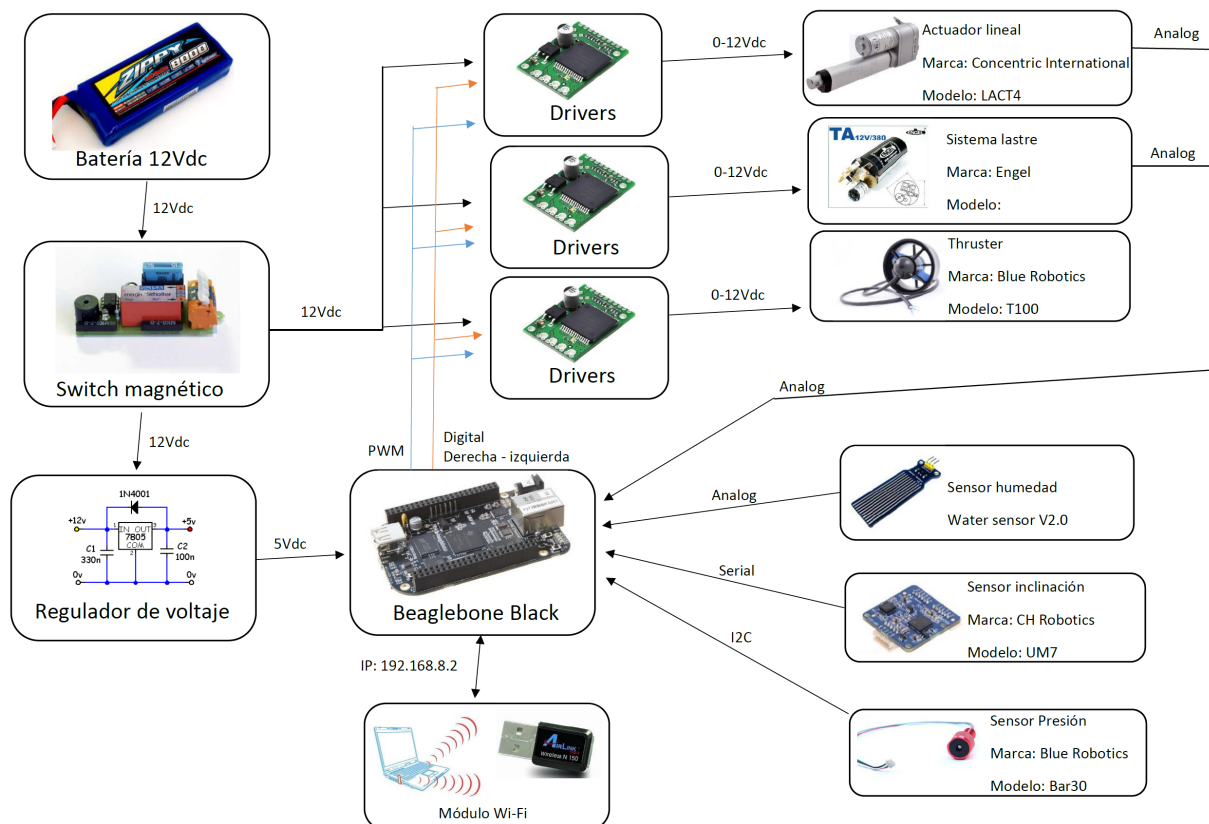


Figura 4.9: Arquitectura electrónica

La comunicación de sensores y componentes con la tarjeta BeagleBone Black puede realizarse mediante:

- Analógica
- I2C
- UART
- PWM

Los sensores y actuadores de la arquitectura electrónica se muestran en la siguiente tabla 4.1:

Componente	Descripción
	Sensor bar 30: Empaquetado metal-cerámico de dimensiones $3,3 \times 3,3 \times 2,75$ cm; Modulo de alta resolución de 0.2 mbar; 24 bit ADC; Voltaje de alimentación de 1.5 a 3.6 Vdc; Rango de operación de 0-30 bar; Interfaz I2C.
	Sensor humedad: Voltaje de alimentación de 5 Vdc; corriente de operación $<20\mu\text{A}$; Interfaz analógica; Banda de detección de $4 \times 1,6$ cm; Temperatura de trabajo 30°C .
	Sensor de inclinación(UM7): Voltaje de alimentación de 5 Vdc; Voltaje de comunicación 3.3 Vdc; consumo de $50\mu\text{A}$; Temperatura de operación $-40 - 85^{\circ}\text{C}$; Dimensiones $2,5 \times 2,5 \times 0,6$ cm.
	Actuador propulsor: Voltaje de alimentación 6-16 Vdc; Dimensiones $11,9 \times 9,6 \times 9,6$ cm; corriente máxima 12.5 A; 3000-4200 Rpm; Peso máximo 378 g.
	Actuador lineal (masa movil): Voltaje de alimentación 12 Vdc; Capacidad de carga dinámica 15Kg; velocidad de 1.7/s; 10.1cm de carrera.
	Sistema Lastre: Voltaje de operación 12 Vdc.

Cuadro 4.1: Descripción de componentes utilizados en glider prototipo Kay Juul H.

Dentro de la programación de la Beagle se genera un archivo de texto el cual se guarda en su memoria para posteriormente sacarlo mediante una interfaz WinSCP por medio de la conexión a una red local de la PC y un módulo Wi-fi, este módulo permite la conexión entre PC y Prototipo.

4.3. Adquisición, procesamiento y envío de datos

Los datos que manejaremos son principalmente presión, ángulo de pitch y roll; para los dos últimos tenemos que configurar primeramente el sensor de inclinación. Con ayuda del Redshift serial interface podemos configurar al sensor de inclinación para que mande el paquete de datos que nos interesa, en este caso fue seleccionada la configuración PCHRP la cual nos manda un paquete de datos como el siguiente: *PCHRP,time,pn,pe,alt,roll,pitch,yaw,heading,*checksum* estos datos los envía por medio del puerto serie a la tarjeta Beaglebone Black donde por medio de la programación se separan los datos y se seleccionan solos los de interés.

Para la comunicación con el sensor de presión es necesario utilizar la comunicación I2C que por default trae el sensor, esta señal de datos nos da un valor en mili volts que es convertido por medio del programa para su correspondencia en milibares de presión, midiendo de esta forma la posición del vehículo en su eje *z* de desplazamiento (profundidad).

La tarjeta Beaglebone Black cuenta con los siguientes puertos:

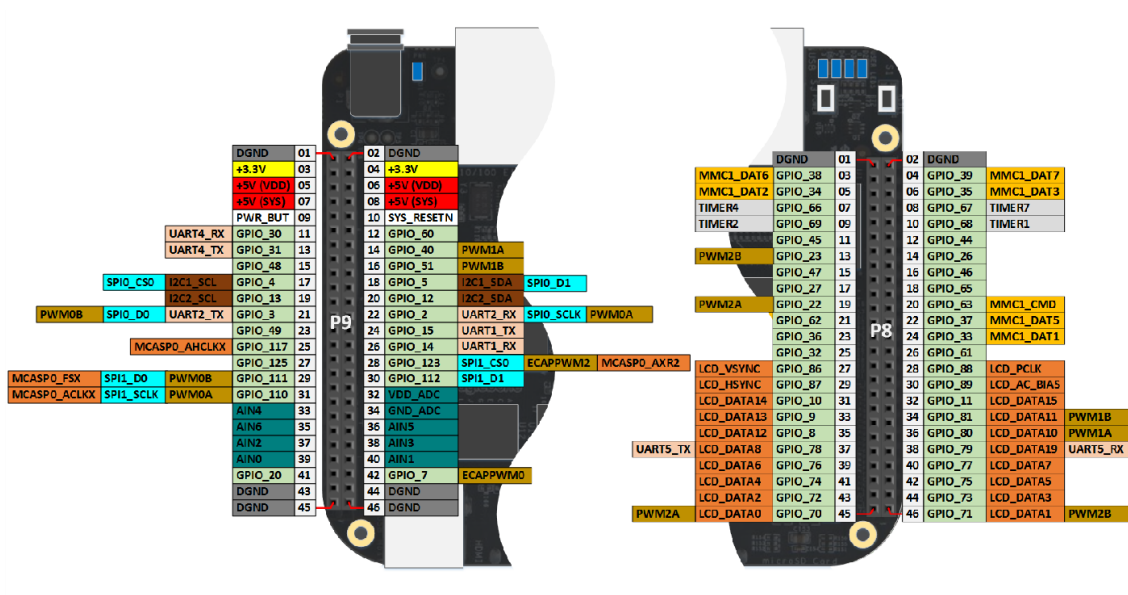


Figura 4.10: Puertos de tarjeta Beaglebone Black.

De los puertos mostrados en la figura 4.1 solo son usados los siguientes:

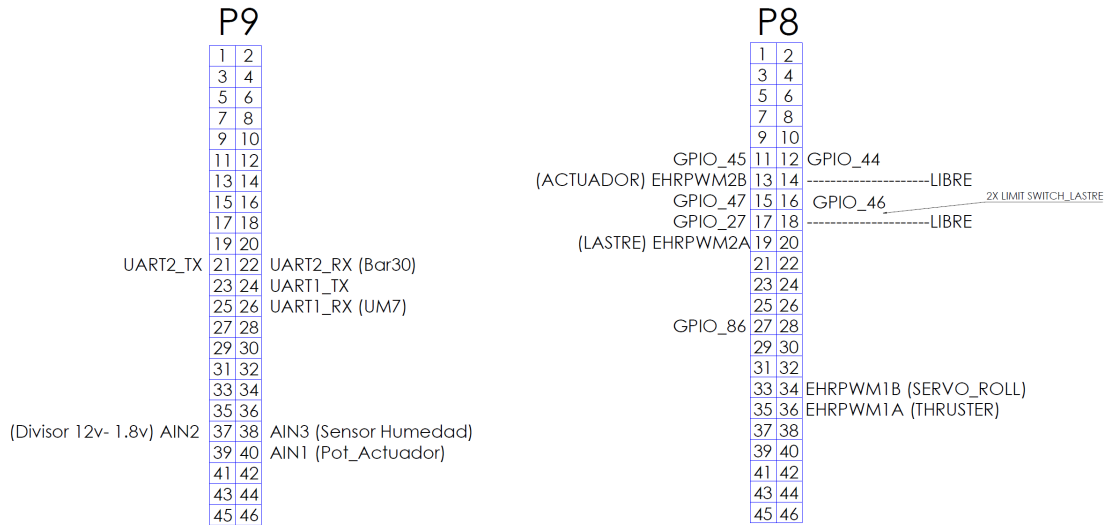


Figura 4.11: Puertos de tarjeta Beaglebone Black utilizados.

En los 4 puertos PWM que se utilizan: dos de ellos son salidas a controladores drivers para motores con alimentación a 12Vdc (uno para el motor del actuador lineal y otro para el motor del sistema lastre). Y uno más a un servomotor del mecanismo de roll y finalmente el último al propulsor, el servomotor y el propulsor tienen una característica que si se manda un ancho de pulso de $1500\mu\text{seg}$ el motor se encuentra en una posición estática, si el ancho de pulso es mayor gira en sentido horario, de lo contrario giraría en sentido antihorario

La presión (profundidad donde se encuentra el glider), ángulo de pitch y roll son utilizados para efecto del control, para este caso un control PD Deslizante de segundo orden. Este control es más robusto y rápido que un PID convencional. La implantación de esta técnica de control avanzada fue una de las contribuciones en este trabajo, debido a que esta técnica de control no ha sido usada en un Glider Híbrido.

En los diseños de la arquitectura electrónica entra un diseño de una tarjeta de conexiones un shield para la Beaglebone Black el cual se diseñó y construyó específicamente para esta tarjeta en el software de Altium, en la siguiente figura se muestra su circuito PCB.

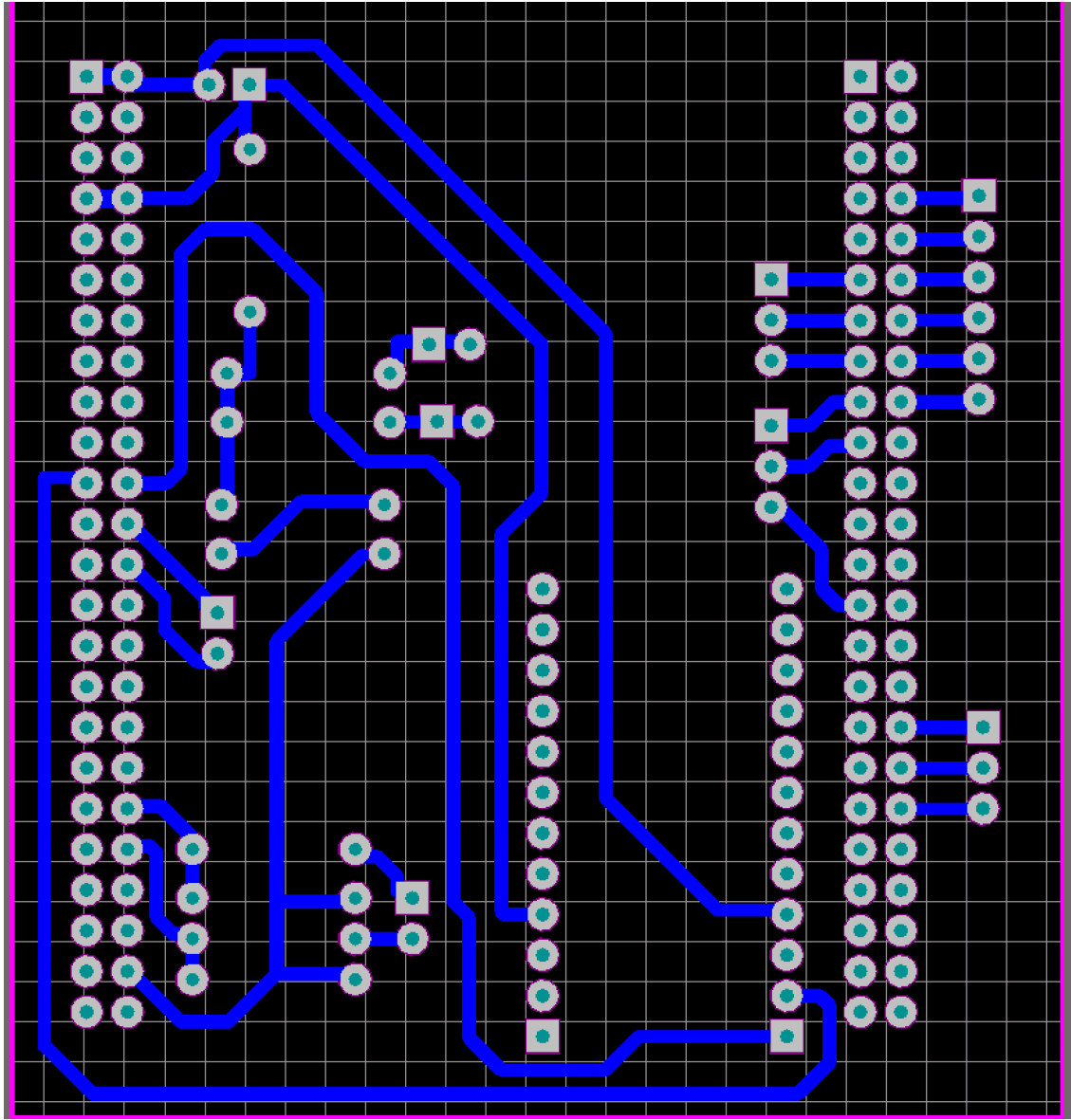


Figura 4.12: Shiel PCB para Tarjeta Beaglebone Black de prototipo Kay Juul H.

4.4. Diagrama de flujo del funcionamiento

El funcionamiento del glider prototipo Kay Juul H tiene en esencia el mismo funcionamiento que un glider normal como por ejemplo el Seaglider de Kongsberg que modifica su capacidad en el lastre para poder desplazarse en el agua, el siguiente diagrama de flujo muestra como los sistemas de lastre, roll y pitch funcionan para hacer que Kay Juul H tenga un desplazamiento parecido a diente de sierra (no es senoidal ni diente de sierra).

Primeramente se tiene que vaciar el lastre para que este suba por completo a la superficie del agua, posteriormente se realiza una estabilización con respecto a sus ángulos de inclinación con respecto de la horizontal, el glider Kay Juul H debe iniciar en una posición en donde sus ángulos de pitch y roll se encuentren en una banda de entre $+/- 2^\circ$ respectivamente de la horizontal (0°).

Una vez dentro de esa banda se acciona el propulsor por un determinado tiempo (10 seg para este caso), después de este periodo de tiempo se activa el control (independiente para cada ángulo de inclinación) dando un punto de ajuste deseado (sugerido 30°) a la par que el sistema de lastre se está llenando para comenzar su desplazamiento por gravedad dentro del agua. El sistema de lastre está gobernado por un sensor de presión el cual dependiendo los valores que esté leyendo y el punto máximo y mínimo de profundidad (definido por el operador) controlará el sistema de lastre. Al final este ciclo se repite indefinidamente hasta que el operador interrumpe su ejecución y se comienza nuevamente vaciando el lastre y ajustando sus ángulos en la horizontal.

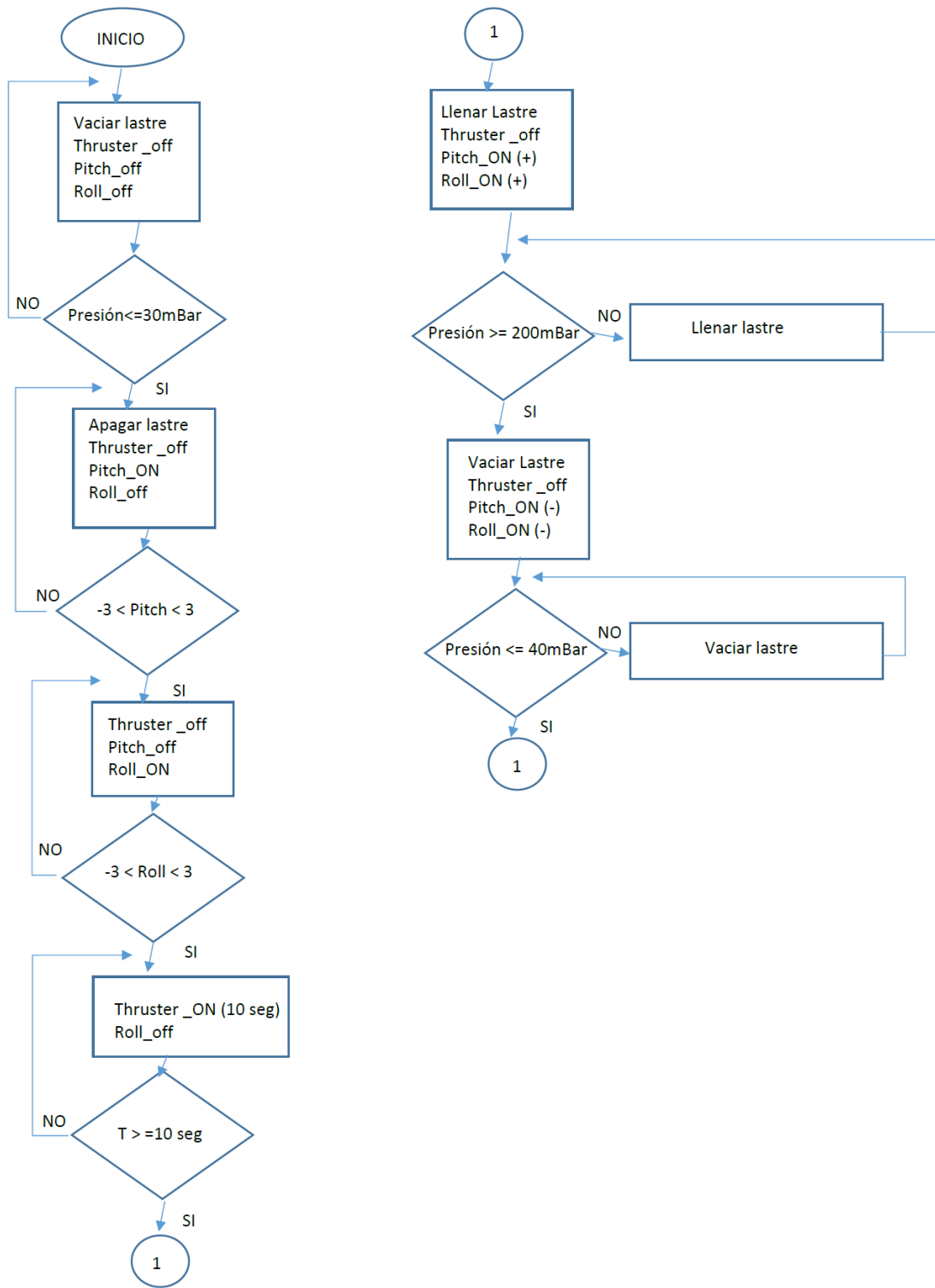


Figura 4.13: Diagrama de flujo del funcionamiento de glider prototipo Kay Juul H.

DISEÑO DEL CONTROLADOR Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta el análisis desarrollado para la elección de las variables a controlar en el glider prototipo *Kay Juul H*. Una vez seleccionadas dichas variables se procede a la descripción del algoritmo de control implementado en este trabajo, el cual fue seleccionado por dos razones: es un esquema de control libre de modelo y el desempeño satisfactorio obtenido al ser implementado en sistemas submarinos.

5.1. Control PD Deslizante de Segundo Orden

El análisis del estado del arte arroja que en gliders comerciales los controladores implementados son convencionales PD's o PID's. Y que los esquemas de control aplicados en gliders académicos son basados en modelo, por lo cual no pueden ser aplicados en el prototipo presentado en este trabajo, debido a que el modelo del glider *Kay Juul* escapa del alcance de este trabajo.

El objetivo del trabajo aquí presente es el control de variables de sus ángulos pitch(θ) y roll(ϕ), también es oportuno mencionar que no se cuenta con el modelo o parámetros de *Kay Juul H*, por ello uno de los requerimientos del esquema de control es que éste sea libre de modelo, además de que sea adecuado para el seguimiento de trayectorias.

El esquema de control PD Deslizante de segundo orden es considerado un esquema no lineal que ofrece estabilidad global de todas las señales en lazo cerrado con convergencia exponencial de los errores de seguimiento [12]. Es un controlador de estructura variable, libre de modelo, lo cual implica que no es necesario incorporar información del sistema a la

ley de control, unido a esto presenta un gran ventaja frente al control Deslizante de primer orden, por medio de la integración de la función $sgn(S_q)$ elimina el problema de vibración conocido como *chattering*.

Las salidas de control han sido definidas como $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_4 \end{bmatrix}^T$, donde u_1 y u_4 son entradas de control al glider. Ahora se propone la referencia nominal $\dot{\eta}_r$ [12][13][16]:

$$\dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d - \alpha \tilde{\eta} + S_d - K_i \int_0^t sgn(S_q(\sigma)) d\sigma \quad (5.1)$$

donde α y K_i son matrices diagonales de ganancias $n \times n$ definidas positivas, $sgn(S_q)$ es la función signo del vector que contiene a las variables de interés y $\tilde{\eta}$ representa el error de seguimiento:

$$\tilde{\eta} = \eta - \eta_d \quad (5.2)$$

$$S_q = S - S_d \quad (5.3)$$

$$S = \dot{\tilde{\eta}} + \alpha \tilde{\eta} \quad (5.4)$$

$$S_d = S(t_0) e^{-\kappa t} \quad (5.5)$$

Donde κ es una constante mayor a cero, $S(t_0)$ permanece con el valor de $S(t)$ en $t = 0$. Con el término S_d se garantiza que la condición contenida dentro de la superficie desde $t = 0$, debido a que genera un doblez en la superficie original como se ilustra en la figura 5.1

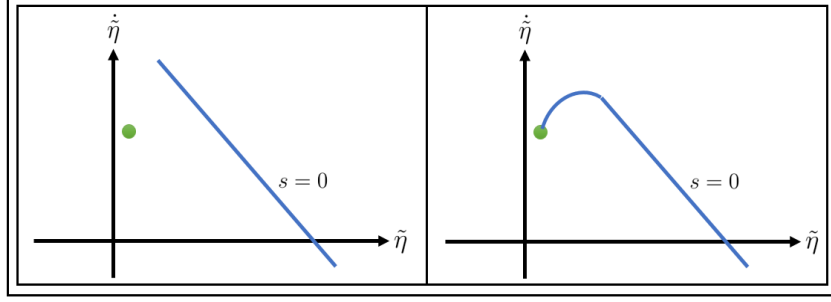


Figura 5.1: Diagrama de fase, inducción de la superficie deslizante.

La variable de error extendido se representa como:

$$S_r = \dot{\eta} - \dot{\eta}_r \quad (5.6)$$

al sustituir (5.1) en (5.6) tenemos:

$$S_r = S_q + K_i \int_0^t \text{sgn}(S_q(\sigma)) d\sigma \quad (5.7)$$

Finalmente la ley de control es:

$$u_i = -K_d S_r \quad (5.8)$$

donde $K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal definida positiva. Como se puede observar el control no necesita los parámetros del sistema ni la dinámica del mismo. Al sustituir la ecuación (5.7) en (5.8), se obtiene la ley de control expandida.

$$u_i = -K_d \alpha \tilde{\eta} - K_d \dot{\tilde{\eta}} - K_d K_i \int_0^t \text{sgn}(S_q(\sigma)) d\sigma \quad (5.9)$$

Pasando ecuación (5.9) a variables particulares del sistema se tiene:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_\theta \\ \tau_\phi \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} \alpha_\theta K_{d\theta} & 0 \\ 0 & \alpha_\phi K_{d\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta - \theta_d \\ \phi - \phi_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{d\theta} & 0 \\ 0 & K_{d\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \\ \dot{\phi} - \dot{\phi}_d \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} K_{i\theta} K_{d\theta} & 0 \\ 0 & K_{i\phi} K_{d\phi} \end{bmatrix} \int_0^t \text{sign} \left(\begin{bmatrix} S_\theta - S_{d\theta} & 0 \\ 0 & S_\phi - S_{d\phi} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Donde S y S_d están dados por:

$$\begin{bmatrix} S_\theta \\ S_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \\ \dot{\phi} - \dot{\phi}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_\theta & 0 \\ 0 & \alpha_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta - \theta_d \\ \phi - \phi_d \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} S_{d\theta} \\ S_{d\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\theta(t_0) e^{-\kappa_\theta t} & 0 \\ 0 & S_\phi(t_0) e^{-\kappa_\phi t} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

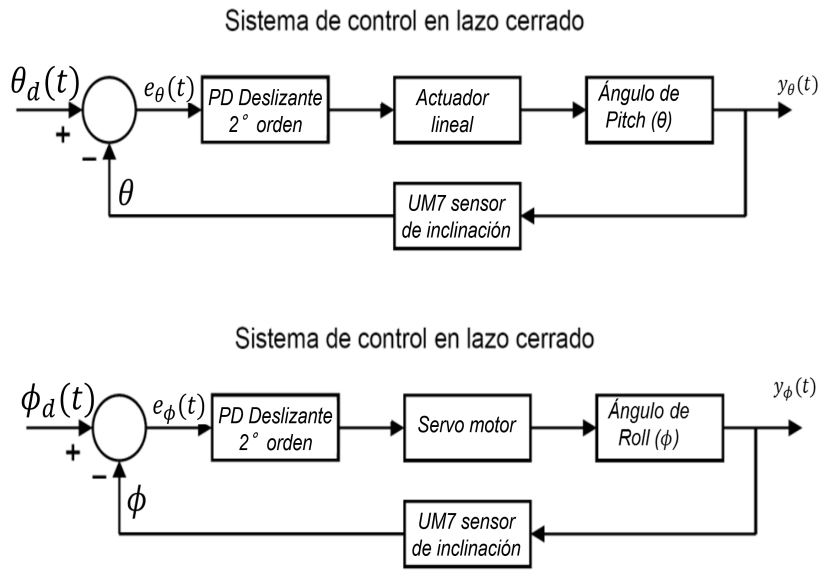


Figura 5.2: Diagrama de control Pitch y Roll Prototipo Kay Juul H.

Se sugiere seguir una serie de pasos para la sintonización de esta ley de control [12][13][16]:

- Proponer como punto inicial las ganancias K_i y α pequeñas.
- Incrementar la ganancia de retroalimentación K_d hasta un límite aceptable donde aparezca S_r .
- Incrementar gradualmente K_i hasta inducir el modo deslizante .
- Incrementar α hasta lograr un mejor comportamiento en el seguimiento de la trayectoria deseada.

De acuerdo al análisis de la sección anterior, las variables a controlar son: el ángulo de inclinación pitch (θ), roll (ϕ). Las variables restantes como profundidad, humedad, y posición de la masa no son tan críticas como los ángulos de inclinación, el objetivo general de esta tesis es el control de los ángulos de inclinación ($pitch(\theta)$ y $roll(\phi)$) mediante el diseño, construcción e implementación de un sistema que permita el movimiento en estos ángulos para mejorar el seguimiento de trayectorias utilizando el esquema de control deslizante de segundo orden.

5.2. Sintonización del control

En [12] se sugiere seguir una serie de pasos para la sintonización de esta ley de control:

1. Proponer como punto inicial las ganancias K_i y α pequeñas.
2. Incrementar la ganancia de retroalimentación K_d hasta un límite aceptable donde aparezca S_r .
3. Incrementar gradualmente K_i hasta inducir el modo deslizante.
4. Incrementar α hasta lograr un mejor comportamiento en el seguimiento de la trayectoria deseada.

Como se sugiere la parte de la sintonización se puede ver que es una sintonización un poco heurística (sintonizar las ganancias basados en una experiencia o experimentación), facilitando el acomodo de las ganancias para garantizar una mejora en la respuesta del control.

Este tipo de sintonización se aplica para ambos controles por separado Pitch y Roll, los cuales tienen las mismas variables pero con diferentes valores, por ejemplo en ambos controles se presenta un α pero para el control de pitch esta alfa tiene un valor mas alto que en la que se aplica para el roll, así mismo para las demás variables, tienen diferente valor entre cada control.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se abordan los resultados experimentales de la implementación del esquema de control PD Deslizante sobre los ángulos de inclinación $Pitch(\theta)$ y $roll(\phi)$. Se presentan y analizan los experimentos llevados a cabo en tanque de agua salada y en alberca. En este caso el control fue implementado directamente sobre los ángulos de inclinación, y la masa del lastre se limitó a tres estados, cuyo cambio depende de la profundidad y posición de vehículo sobre la trayectoria en patrón diente de sierra.

Los experimentos fueron realizados en un tanque de agua salada con dimensiones $2,5m \times 3,5m \times 2,5m$ estos resultados se encuentran limitados a la respuesta en este espacio. En trabajos futuros se piensa probar el prototipo en un espacio con mayores dimensiones como una alberca semi-olímpica, la cual tiene dimensiones mucho mayores permitiendo de esta manera obtener una respuesta de 3 o más dientes de sierra en lugar de uno o dos como se tiene en el tanque.

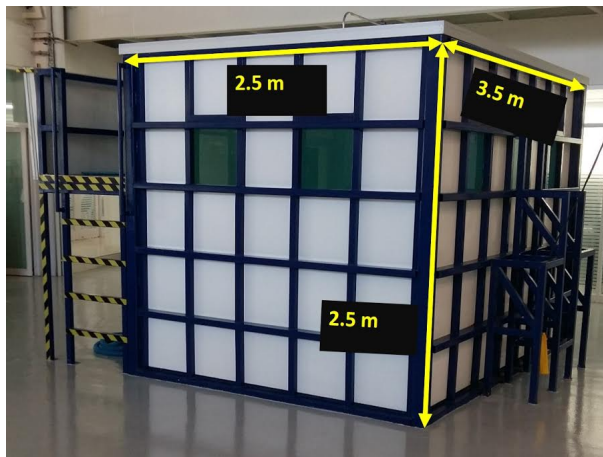


Figura 6.1: Tanque de agua salada del CIDESI.

A continuación se enlistan los pasos realizados para llevar a cabo dichos experimentos:

1. Conexión a la red Wifi generada por medio del módulo montado en la computadora principal dentro del glider.
2. Conexión remota por medio de la terminal SSH (Software PUTTY) y SCP(Software WinSCP).
3. Desplegar el glider en la alberca para comenzar a balancear del vehículo.
4. Llenar el lastre a la mitad de su capacidad para alcanzar una flotabilidad neta ligeramente positiva.
5. Colocar la masa móvil en una posición en donde el vehículo se encuentre balanceado.
6. Por medio de la consola de acceso remoto, ejecutar el programa que realizará las tareas necesarias para el desempeño de la trayectoria en patrón diente de sierra.
7. El programa pide que el usuario determine ciertas condiciones y valores para ejecutar la trayectoria, estos son los datos que requiere y su orden.
 - a) Angulo deseado $Pitch(\theta_d)$ y $Roll(\phi_d)$ o set point.
 - b) Capacidad de lastre definida en ml.
 - c) Profundidad[0 : 200mbar](0 a 2 metros).
 - d) Activar y desactivar tareas manualmente.
 - e) Las ganancias para cada control respectivo a cada ángulo de inclinación
 - f) Ganancia $K_{d\theta}$ es diferente para pitch y roll $K_{d\phi}$.
 - g) Ganancia α_θ es diferente para pitch y roll α_ϕ .
 - h) Ganancia $K_{i\theta}$ es diferente para pitch y roll $K_{i\phi}$.
 - i) Ganancia κ_θ es diferente para pitch y roll κ_ϕ .
8. Arranque del programa para realizar la trayectoria definida de las variables.

9. Esperar a que el vehículo emerja y una vez en la superficie extraer el archivo con los datos generados durante la trayectoria realizada.

Los primeros experimentos realizados en la superficie de agua mostraron movimientos oscilantes debido a que las ganancias del control no estaban ajustadas, los movimientos eran con grandes oscilaciones. Un ejemplo en Roll el Glider comienza a realizar muchas oscilaciones antes de acercarse a su set-point(20°).

Cuadro 6.1: Ganancias del control Roll.

Variable	$K_{d\phi}$	α_ϕ	$K_{i\phi}$	κ_ϕ
Valor	1	1.5	0.01	2

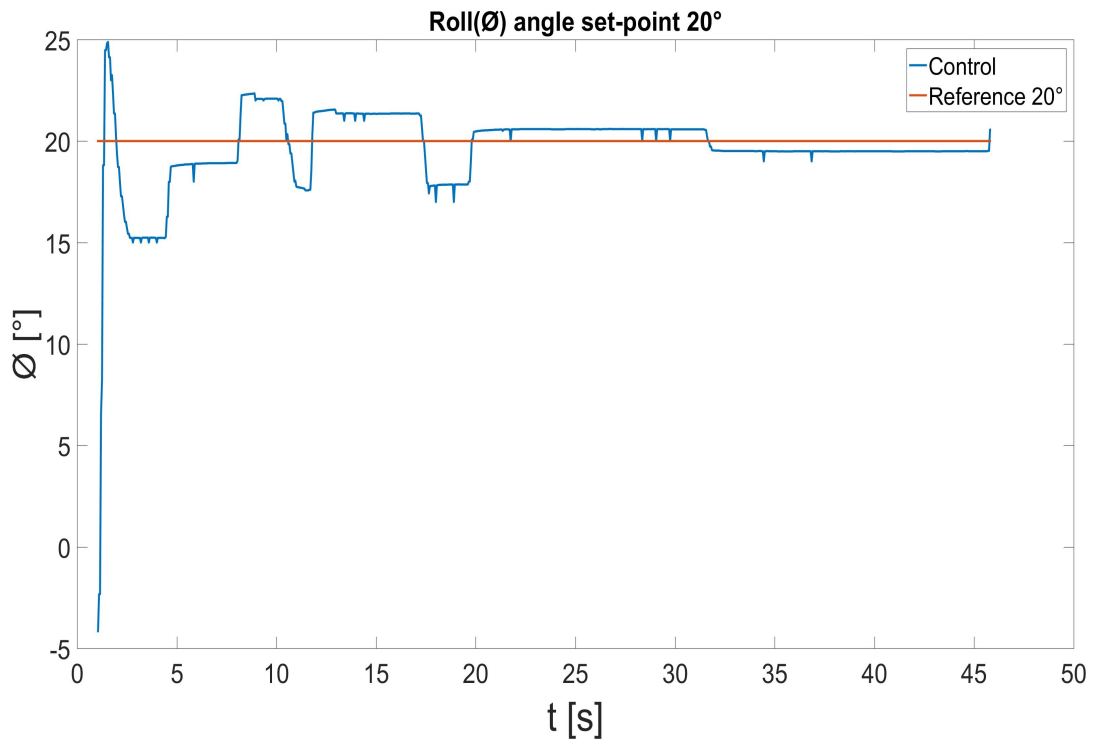


Figura 6.2: Control de Roll con set point 20°.

La Figura 6.2 muestra como el control trata de converger a su set-point de 20° en un tiempo de 22seg pero no converge como tal solo se aproxima a su punto de ajuste con 1° por enésima y por debajo de su valor. Posterior a la respuesta de oscilaciones se ajustan las ganancias para mejorar la respuesta del control, estas ganancias son las que se muestran en la Tabla 6.1 y su respuesta en la figura 6.3.

Cuadro 6.2: Ganancias del control Pitch.

Variable	$K_{d\theta}$	α_θ	$K_{i\theta}$	κ_θ
Valor	1	2	0.01	1

La respuesta del control Pitch a estas ganancias se muestra en la siguiente figura:

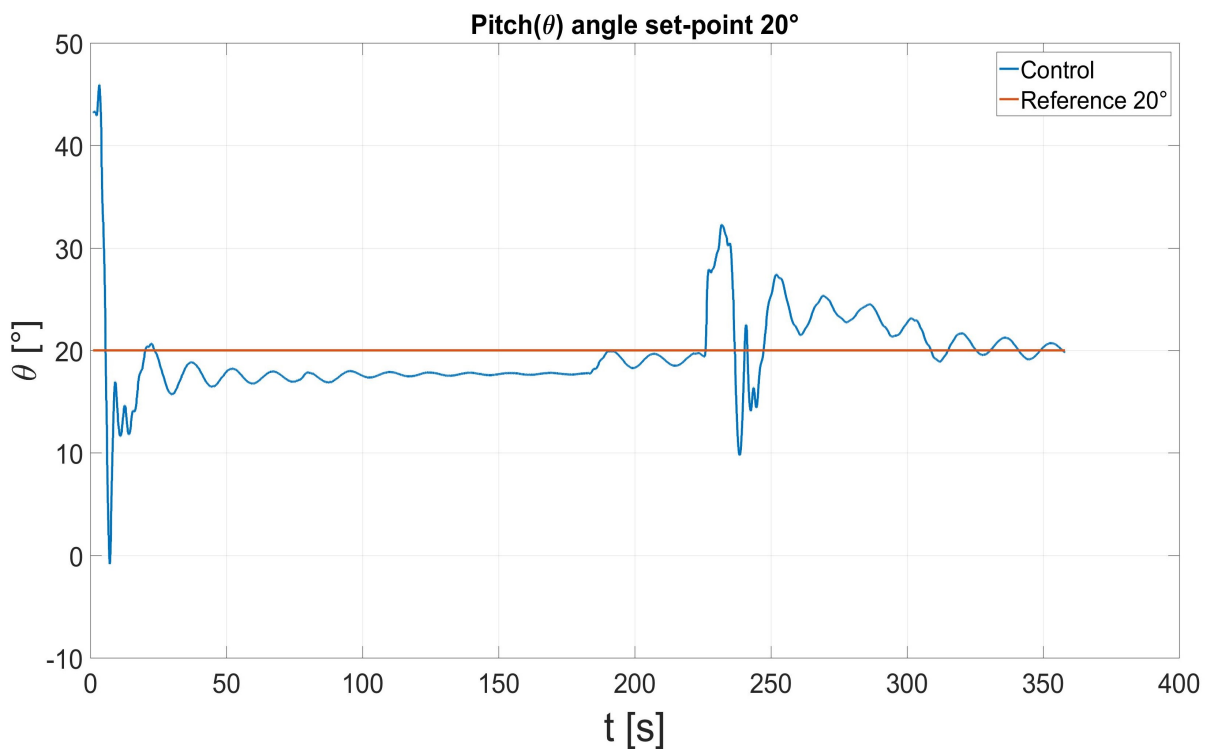


Figura 6.3: Control de Pitch set point 20° .

Esta prueba fue realizada para Pitch en la cual podemos ver que el control se está llevando a cabo con un pequeño ofset con respecto al set-point se logra estabilizar, se realiza una

perturbación externa para ver si el control podría controlarla y los resultados fueron satisfactorios pues el control se realiza adecuadamente, logrando converger en su punto de ajuste y mantenerse ahí.

Una segunda prueba con las ganancias mejoradas en roll fue la siguiente:

Cuadro 6.3: Ganancias del control Roll.

Variable	$K_{d\phi}$	α_ϕ	$K_{i\phi}$	κ_ϕ
Valor	1	2.5	0.03	1.8

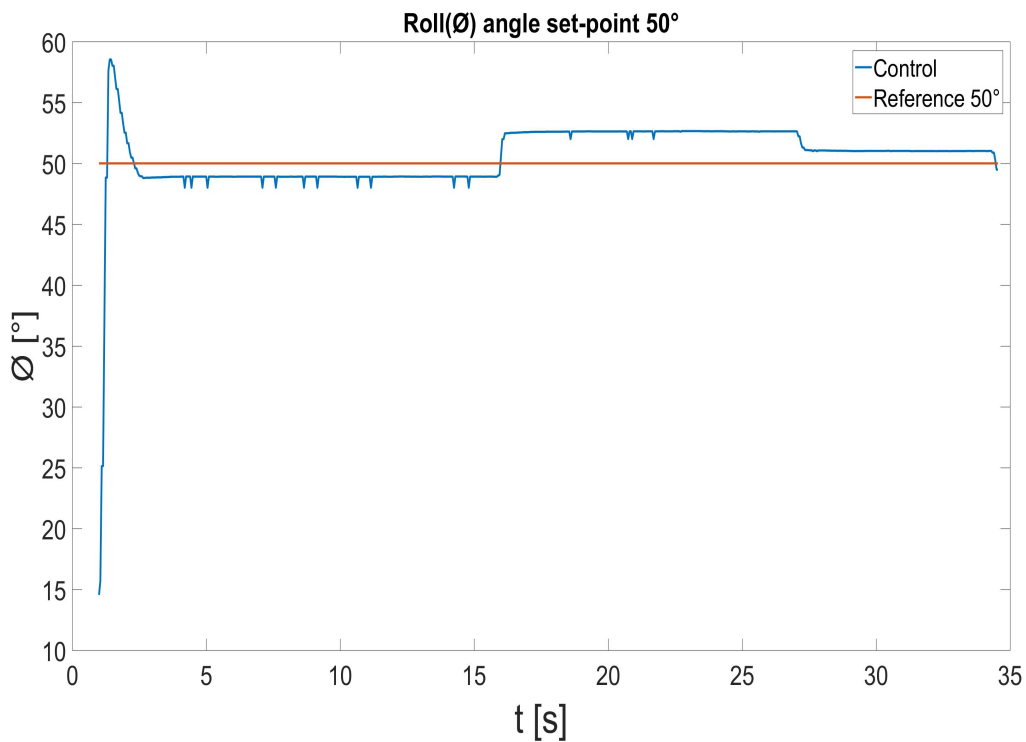


Figura 6.4: Control de Roll set point 50°.

El control ya no presenta oscilaciones como en las primeras pruebas pero tiene un ofset con respecto a su punto de ajuste, se debe a una banda muerta de operación dentro del servo

motor ver figura 6.5, una banda de aproximadamente 400ms, ocasionando que el error de posición se acumule llegando a un punto donde el motor reacciona al 100% de su velocidad y ocasiona este offset.

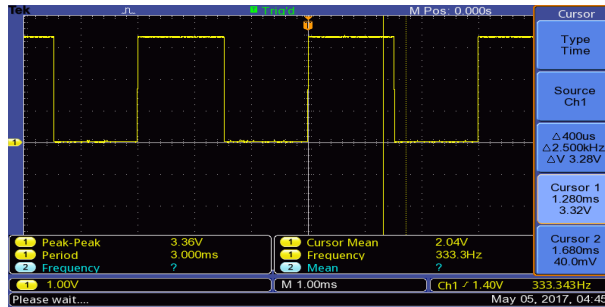


Figura 6.5: Banda muerta servomotor.

Para corroborar que el sistema es un sistema No lineal se realizó una prueba en la respuesta del desplazamiento de la masa móvil, esto para verificar la respuesta de inclinación del prototipo a un correspondiente desplazamiento de la masa (2mm).

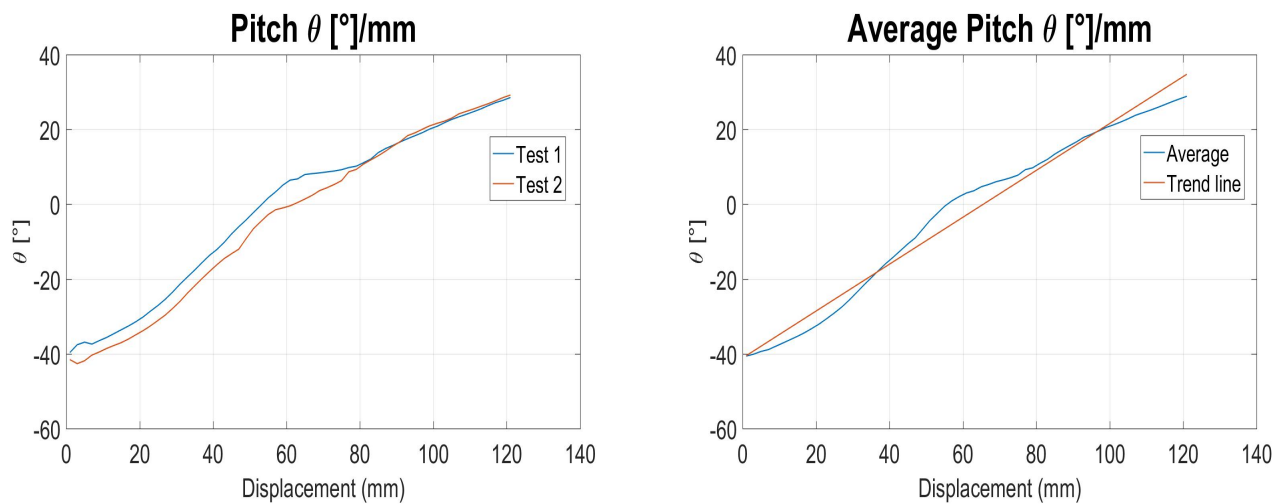


Figura 6.6: Respuesta de inclinación del prototipo vs un desplazamiento de la masa.

Posteriormente a las pruebas iniciales se realizaron pruebas con el ángulo pitch para mejorar y sintonizar las ganancias del control, la siguiente figura muestra una tabla de la respuesta en pitch a una profundidad de 2 mts, la respuesta del control muestra una estabilidad a partir de los 30 seg restandole de esta manera un viaje de 15seg con esa

inclinación a 30° antes de llegar a una profundidad de 2 mts; el sistema de lastre a su vez tiene una capacidad del 80% en los primeros 15 seg y manteniendo así por un periodo de 20 seg antes de emerger.

La respuesta del actuador ante este esquema de control no es tan agresiva, permitiendo un ahorro de energía, sus movimientos son aceptables dentro de los experimentos para pitch, la carrera de este es de 4 pulgadas, iniciando en el medio de su carrera que es donde el vehículo tiene una horizontal de $+/- 3^\circ$. La velocidad a la cual se sumerge es aproximadamente no mayor a 10cm/seg, la experimentación para este caso fue en un tanque de agua salada dentro de las instalaciones de CIDESI fig 6.1.

Cuadro 6.4: Ganancias del control Pitch.

Variable	$K_{d\theta}$	α_θ	$K_{i\theta}$	κ_θ
Valor	4.2	4.2	0.001	9

Cuadro 6.5: Ganancias del control Roll.

Variable	$K_{d\phi}$	α_ϕ	$K_{i\phi}$	κ_ϕ
Valor	3.3	3.6	0.12	5

Para las últimas pruebas las ganancias del control utilizadas para cada uno de los ángulos de inclinación $\text{pitch}(\theta)$ y $\text{roll}(\phi)$ fueron las que se muestran en las tablas (6.4) y (6.5). Debido a la buena respuesta que reflejaba el control se dejaron estas ganancias como las definitivas después de varios experimentos.

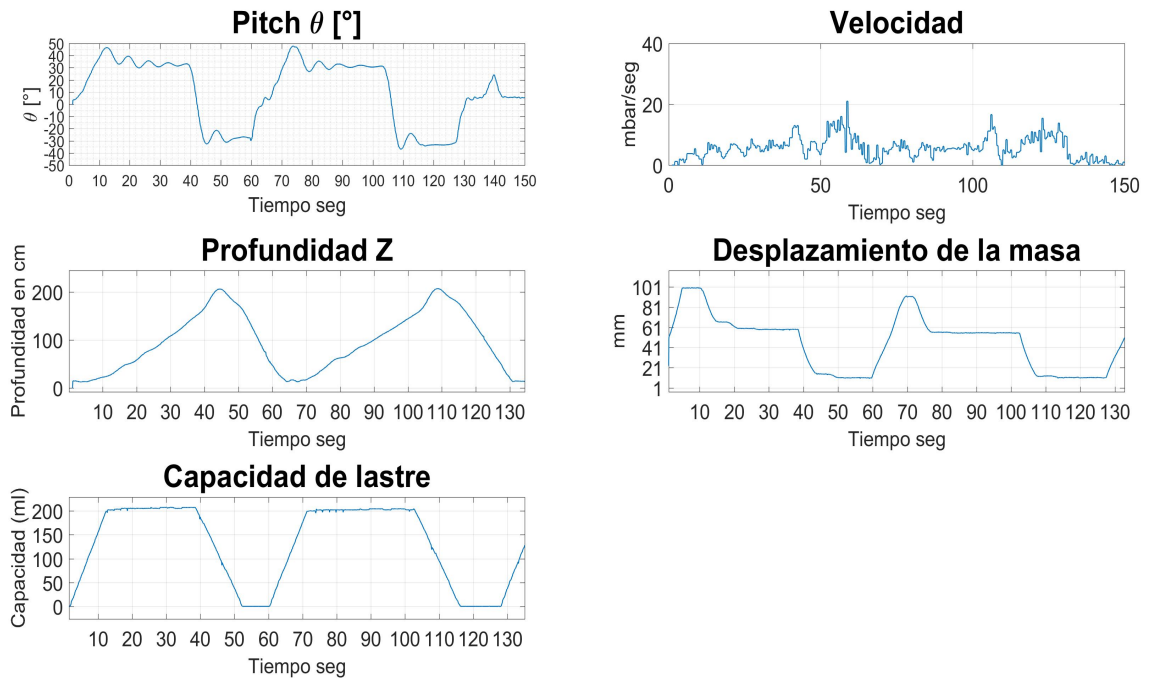


Figura 6.7: Pruebas Pitch 30° (profundidad de 2 mts).

Posterior a las pruebas de pitch y dejarlo con una sintonización dentro de sus ganancias continuamos con el angulo en roll, de la misma manera que se realizó con el pitch, el ángulo de roll también fué probado a la misma profundidad, la respuesta del control en pitch fué similar y en este caso la sintonización del angulo roll resulta satisfactoria ya que se logra una estabilidad antes de los 30seg y de la misma manera para su angulo negativo.

En ambas pruebas el sistema de lastre fué llenado a un 80 % de su capacidad (200ml) para romper su punto de flotabilidad, el movimiento de la masa móvil sigue siendo amigable presentando pocos movimientos innecesarios y ahorrando energía de esta manera.

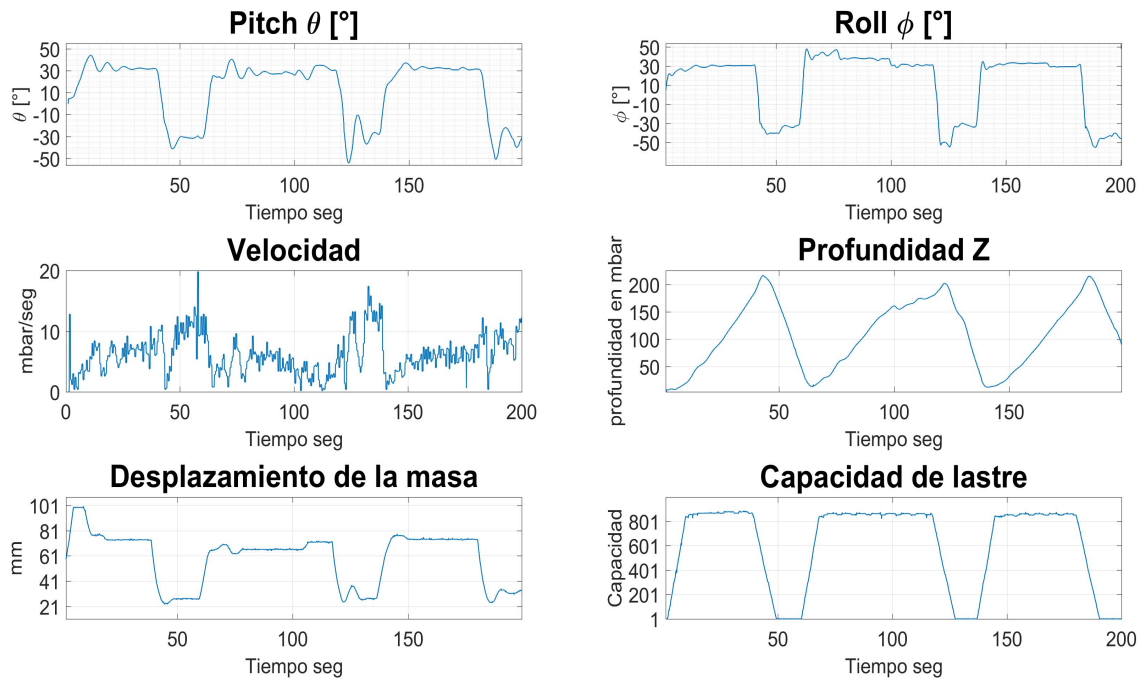


Figura 6.8: Pruebas pitch y roll 30° (profundidad de 2 mts).

Después de tener sintonizado el control se decidió realizar pruebas en un espacio menos profundo pero mas amplio, en la figura 6.9 se muestran los gráficos a una profundidad de 1.3 mts. Como se puede observar el control en pitch no llega a una estabilización pero sin embargo el angulo de inclinación en roll se aproxima a una estabilidad de $\pm 4^\circ$ al punto de referencia, su profundidad máxima es de 1.2 mts, los cambios en el movimiento de la masa móvil son un poco mas rapidos lo cual por efecto de la profundidad que es muy poca realiza este tipo de movimiento ocasionando que el voltaje en las baterías se agote con mayor rapidez.

El efecto de flotabilidad cambió puesto que se realizaron en agua dulce, el prototipo se hundía aun con el lastre completamente vacío y para evitar este contra tiempo se improvisaron esponjas en puntos clave del vehículo para garantizar que se mantuviera a flote y de esta manera poder realizar las pruebas correspondientes fig 6.10.

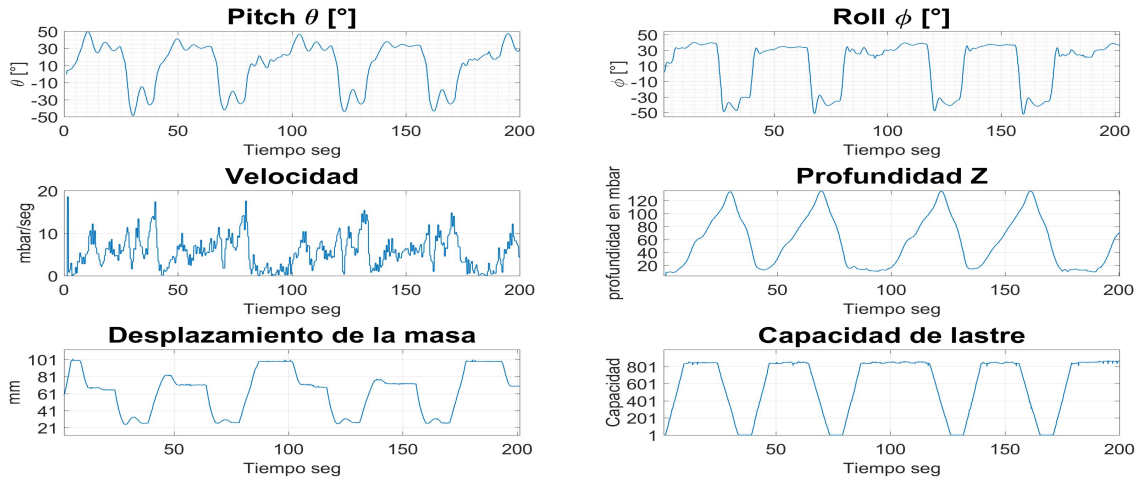


Figura 6.9: Pruebas pitch y roll alberca ITESM Qro. (profundidad 1.3 mts).

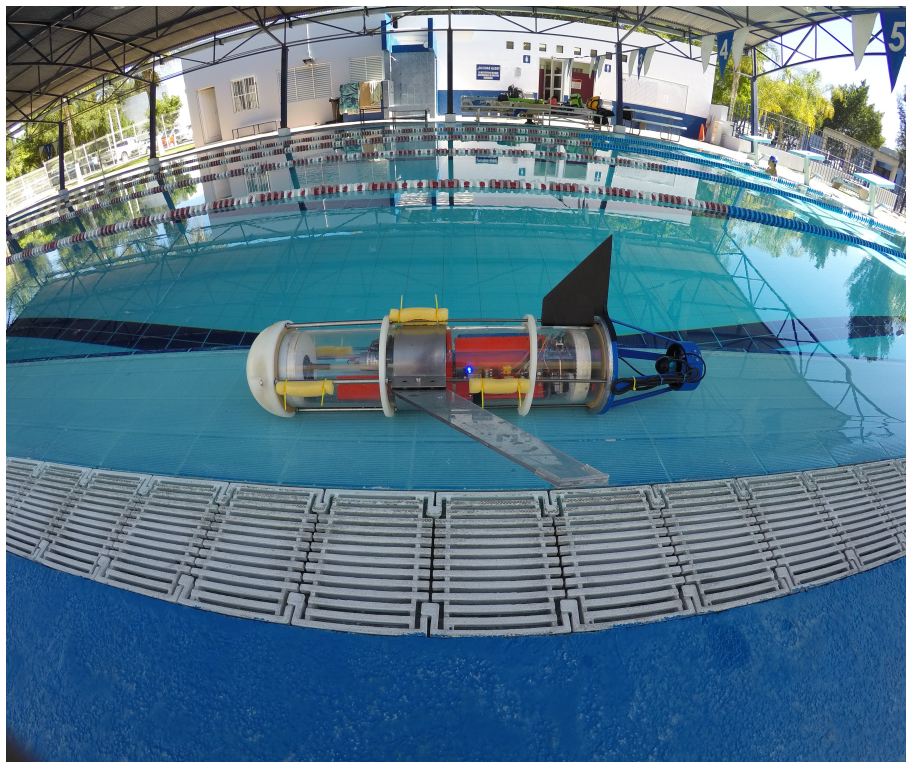


Figura 6.10: Pruebas de control de pitch y roll (alberca ITESM Qro.).

CONCLUSIONES

En esta tesis se abordaron los temas de entendimiento de dinámicas y puesta en marcha de un glider prototipo. Se implementó una ley de control por modos deslizantes de segundo orden, no lineal y libre de modelo, que elimina comportamientos indeseados como la vibración excesiva de los actuadores, típica de un control por modos deslizantes de primer orden. Los resultados obtenidos en el comportamiento de las variables, sobre las cuales se aplicó, son satisfactorios y validan la hipótesis planteada en este trabajo.

Se mejoró el diseño de Kay Juul, diseñando, construyendo e implementando un sistema de movimiento basado en una masa excéntrica para el ángulo de inclinación en roll(ϕ), así mismo dentro de ese sistema una masa móvil de 2 kg para su movimiento en el ángulo de inclinación pitch(θ). Fue un reto diseñar e integrar dos sistemas de movimiento en uno solo en un espacio tan reducido, este fue uno de los aportes dentro de esta tesis (el diseño mecánico).

El objetivo de diseñar, construir e implementar una arquitectura electrónica de control se cumplió con la implementación de drivers de control para los motores, el shield de conexiones único y propio para la tarjeta y el desarrollo de la programación del control PD deslizante de segundo orden fue otra de las aportaciones a esta tesis (diseño electrónico y programación). Fue posible validar por medio de experimentos en campo la efectividad de un esquema de control, que si bien ya ha sido probado en sistemas sub-acuáticos tipo ROV, originalmente fue diseñado para su implementación en robots manipuladores, cuyas características difieren con respecto a los robots submarinos. Así también que la mayoría de los Gliders Híbridos tienen implementados controles como PD, PI, PID y LQR, por lo cual una de las

contribuciones de esta tesis fue la implementación de este control en este tipo de sistemas.

Al tomar en cuenta todos los puntos anteriores, es posible controlar las variables del sistema, sin la necesidad de calcular el modelo dinámico o parámetros del mismo. Las ventajas de este sistema de control deslizante se pueden mencionar:

- Control libre de modelo.
- Control deslizante de segundo orden.
- Control No lineal.

7.1. Contribuciones principales

- Se mejoró el diseño mecánico del glider Kay Juul mediante la construcción e implementación de un sistema de movimiento para $\text{pitch}(\theta)$ y $\text{roll}(\phi)$.
- La arquitectura electrónica fue reemplazada provocando una mejora en la respuesta del movimiento en sus ángulos de inclinación ($\text{pitch}(\theta)$ y $\text{roll}(\phi)$).
- Implementación en tiempo real de la técnica de control PD deslizante de segundo orden en dos grados de libertad (pitch y roll) para un sistema submarino tipo glider.
- Proporcionar entendimiento al grupo de investigación y desarrollo de gliders submarinos de CIDESI en cuanto a la dinámica de gliders así como probar preliminarmente controles avanzados para los mismos.

7.2. Trabajo Futuro

Realizar pruebas en un ambiente con mayor espacio para validar exhaustivamente el seguimiento de trayectorias en diente de sierra. Y como fue mencionado en el primer capítulo, uno de los objetivos de este trabajo es generar las bases para proyectos futuros

sobre gliders, y generar diseños escalables para prototipos posteriores dentro de las instalaciones de CIDESI.

Dichos gliders podrían generar temas de investigación como:

- Desarrollo del modelo matemático de un glider específico para análisis de desempeño con esquemas de control basados en modelo.
- Desarrollo de un observador de estados, para la implementación de controles de tipo adaptable.
- Implementación de herramientas de visión para la mejora de seguimiento de trayectorias.
- Implementación de sistemas de eco localización para estimación de posición de estos sistemas.
- Extender el algoritmo de control para más variables e implementación en 3D.

Bibliografía

- [1] P. Bhatta and N. Leonard (2002). “*Stabilization and Coordination of Underwater Gliders. Proc.*”. 41st IEEE Conf. Decision and Control, Princeton University, USA.
- [2] Joshua Grady Graver (2005). “*Underwater gliders: dynamics, control and design*”. PhD Thesis, Faculty of Princeton University, May, 2005.
- [3] Wang,X and Sun,J (2010). “*Motion Characteristic Analysis of a Hybrid-Driven Underwater Glider*”. OCEANS 2010 IEEE - Sydney, Sydney Australia.
- [4] Maziyah Mat Noh, Mohd Rizal Arshad and Rosmiwatii Mohd Mokthar (2011). “*Depth and pitch control of USM underwater glider: performance comparison PID vs. LQR*”. Journal of Geo-Marine Sciences vol. 40, April 2011, pp. 200-206.
- [5] Choi, S and Do, J (2014). “*Roll/pitch attitude control of an underwater robot using ballast tanks*”. IEEJ transactions on electrical and electronic engineering.
- [6] Hector A. Morenoa, Roque Saltaren, Lisandro Puglisi, Isela Carrera, Pedro Cardenas y Cesar Alvarez (2014). “*Robotica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control*”. Revista iberoamericana de Automática e informatica industrial RIAI, vol. 1, pp. 1-19.
- [7] Clayton Jones ,Ben Allsup and Christopher DeCollibus (2014). “*Slocum Glider*”. 2014 Oceans - St. John’s, St. John’s, NL, pp. 1-10 , USA 2014.

- [8] Yang, C and Peng, S (2014). “*Performance and stability analysis for ZJU glider*”. Marine Technology Society Journal, 2014.
- [9] Huanyin Zhou, Kaizhou Liu, Yiping Li and Shenzhen Ren (2014). “*Dynamic Sliding Mode Control Based on Multi-model Switching Laws for the Depth Control of an Autonomous Underwater Vehicle*”. International Journal of Advanced Robotic Systems, regular paper, pp. 2-7.
- [10] Ngoc-Huy Tran, Hyeung-Sik Choi, Jae-Hyun Bae and Ji-Youn Oh (2015). “*Design, Control, and Implementation of a New AUV Platform with a Mass Shifter Mechanism*”. International journal of precision engineering and manufacturing, vol. 16, no. 7, pp. 1599-1608.
- [11] Hong, E and Chitre, M (2015). “*Roll control of an autonomus underwater vehicle using an internal rolling mass*”. Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore, Singapore.
- [12] L.G.Garcia Valdovinos, T. Salgado Jiménez, H. Torres Rodríguez. “*Model- free High Order Sliding Mode Control for ROV: Station-keeping Approach*”. OCEANS 2009, Biloxi, MS, USA, pp. 1-7, 2009.
- [13] I. Andrade-Bustos, L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez and M. Bandala-Sánchez, “*Sliding-PD control performance on autonomous underwater gliders*”. OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, Washington, DC, USA, pp. 1-5 2015.
- [14] Andrea Caffaz, Andrea Caiti, Giuseppe Casalino, Alessio Turetta, “*The Hybrid Glider/AUV Folaga*”. IEEE Robotics and Automation Magazine, March 2010.

[15] T. I. Fossen, *“Guidance and control of ocean vehicles”*. John Wiley and Sons Inc. 1994.

[16] I. Andrade-Bustos. 2016, *“Control de un robot submarino prototipo tipo Glider”*. (Tesis de maestría). Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Santiago de Querétaro, Qro.

PROTOCOLO UM7

UM7 DATASHEET



Rev. 1.3 – Released 10/27/2014

commands (there are commands for executing calibration operations, resetting the onboard filters, etc. See the Register Overview in this document for more details).

To initiate a command, simply send a packet to the autopilot with the command's address in the packet "Address" byte. The PT byte should be set to zero for a command operation.

If the UM7 successfully completes the specified command, then a `COMMAND_COMPLETE` packet is returned with the command address in the "Address" byte of the response packet. If the command fails, the device responds by sending a `COMMAND_FAILED` packet. The `COMMAND_FAILED` packet is equivalent to the `COMMAND_COMPLETE` packet except that the "Command Failed" bit in the PT byte is set (`CF = 1`).

In some cases, a command will cause specific packets to be sent other than the `COMMAND_COMPLETE` packet. A `GET_FW_VERSION` command will, for example, return a packet containing the version of the firmware installed on the UM7. In this and similar cases, the `COMMAND_COMPLETE` packet is not sent.

Example Binary Communication Code

RECEIVING DATA FROM THE UM7

There are a lot of ways to parse the incoming data from the UM7. Often, it is easiest to write a generalized parser that takes all incoming data and extracts the data, address, and packet type information and then makes it easily accessible to the user program. The following code shows an example of a good general parser that can be used to extract packet data.

```
// Structure for holding received packet information
typedef struct UM7_packet_struct
{
    uint8_t Address;
    uint8_t PT;
    uint16_t Checksum;

    uint8_t data_length;
    uint8_t data[30];
} UM7_packet;
```

UM7 DATASHEET



Rev. 1.3 – Released 10/27/2014

```
// parse_serial_data
// This function parses the data in 'rx_data' with length 'rx_length' and attempts to find a packet
// in the data. If a packet is found, the structure 'packet' is filled with the packet data.
// If there is not enough data for a full packet in the provided array, parse_serial_data returns 1.
// If there is enough data, but no packet header was found, parse_serial_data returns 2.
// If a packet header was found, but there was insufficient data to parse the whole packet,
// then parse_serial_data returns 3. This could happen if not all of the serial data has been
// received when parse_serial_data is called.
// If a packet was received, but the checksum was bad, parse_serial_data returns 4.
// If a good packet was received, parse_serial_data fills the UM7_packet structure and returns 0.
uint8_t parse_serial_data( uint8_t* rx_data, uint8_t rx_length, UM7_packet* packet )
{
    uint8_t index;

    // Make sure that the data buffer provided is long enough to contain a full packet
    // The minimum packet length is 7 bytes
    if( rx_length < 7 )
    {
        return 1;
    }

    // Try to find the 'snp' start sequence for the packet
    for( index = 0; index < (rx_length - 2); index++ )
    {
        // Check for 'snp'. If found, immediately exit the loop
        if( rx_data[index] == 's' && rx_data[index+1] == 'n' && rx_data[index+2] == 'p' )
        {
            break;
        }
    }

    uint8_t packet_index = index;

    // Check to see if the variable 'packet_index' is equal to (rx_length - 2). If it is, then the above
    // loop executed to completion and never found a packet header.
```

Rev. 1.3 – Released 10/27/2014

```

if( packet_index == (rx_length - 2) )
{
    return 2;
}

// If we get here, a packet header was found. Now check to see if we have enough room
// left in the buffer to contain a full packet. Note that at this point, the variable 'packet_index'
// contains the location of the 's' character in the buffer (the first byte in the header)
if( (rx_length - packet_index) < 7 )
{
    return 3;
}

// We've found a packet header, and there is enough space left in the buffer for at least
// the smallest allowable packet length (7 bytes). Pull out the packet type byte to determine
// the actual length of this packet
uint8_t PT = rx_data[packet_index + 3];

// Do some bit-level manipulation to determine if the packet contains data and if it is a batch
// We have to do this because the individual bits in the PT byte specify the contents of the
// packet.
uint8_t packet_has_data = (PT >> 7) & 0x01;    // Check bit 7 (HAS_DATA)
uint8_t packet_is_batch = (PT >> 6) & 0x01;    // Check bit 6 (IS_BATCH)
uint8_t batch_length = (PT >> 2) & 0x0F;       // Extract the batch length (bits 2 through 5)

// Now finally figure out the actual packet length
uint8_t data_length = 0;
if( packet_has_data )
{
    if( packet_is_batch )
    {
        // Packet has data and is a batch. This means it contains 'batch_length' registers, each
        // of which has a length of 4 bytes
        data_length = 4*batch_length;
    }
    else // Packet has data but is not a batch. This means it contains one register (4 bytes)

```



```
{
    data_length = 4;
}
}
else // Packet has no data
{
    data_length = 0;
}

// At this point, we know exactly how long the packet is. Now we can check to make sure
// we have enough data for the full packet.
if( (rx_length - packet_index) < (data_length + 5) )
{
    return 3;
}

// If we get here, we know that we have a full packet in the buffer. All that remains is to pull
// out the data and make sure the checksum is good.
// Start by extracting all the data
packet->Address = rx_data[packet_index + 4];
packet->PT = PT;

// Get the data bytes and compute the checksum all in one step
packet->data_length = data_length;
uint16_t computed_checksum = 's' + 'n' + 'p' + packet_data->PT + packet_data->Address;
for( index = 0; index < data_length; index++ )
{
    // Copy the data into the packet structure's data array
    packet->data[index] = rx_data[packet_index + 5 + index];
    // Add the new byte to the checksum
    computed_checksum += packet->data[index];
}

// Now see if our computed checksum matches the received checksum
// First extract the checksum from the packet
uint16_t received_checksum = (rx_data[packet_index + 5 + data_length] << 8);
```

Rev. 1.3 – Released 10/27/2014

```
received_checksum |= rx_data[packet_index + 6 + data_length];

// Now check to see if they don't match
if( received_checksum != computed_checksum )
{
    return 4;
}

// At this point, we've received a full packet with a good checksum. It is already
// fully parsed and copied to the 'packet' structure, so return 0 to indicate that a packet was
// processed.
return 0;
}
```

Once the packet has been parsed and copied into the packet structure, accessing the desired data is as simple as watching for packets with the desired address, checking the data length to make sure it is as long as you expect, and then pulling the data out of the packet's data array.

GETTING THE FIRMWARE REVISION

To read the firmware revision from the UM7, a GET_FW_REVISION command should be sent to the over the serial port. Recall that to initiate a command on the UM7, a read packet should be sent using the command's address in the 'Address' byte of the packet. For a GET_FW_REVISION command, the address is 170 (0xAA).

C-code for constructing and sending the command is shown below:

```
uint8_t tx_data[20];

tx_data[0] = 's';
tx_data[1] = 'n';
tx_data[2] = 'p';
tx_data[3] = 0x00;    // Packet Type byte
tx_data[4] = 0xAA;   // Address of GET_FW_REVISION register
tx_data[5] = 0x01;   // Checksum high byte
tx_data[6] = 0xFB;   // Checksum low byte
USART_transmit( tx_data, 7 );
```

Rev. 1.3 – Released 10/27/2014

The preceding code assumes that a function called `USART_transmit(uint8_t* data, uint8_t length)` exists that transmits 'length' characters from the provided buffer over the UART.

Once the UM7 receives the above packet, it will respond with a packet containing the firmware revision. Example code for receiving the firmware revision packet is given below. Note that this code assumes that the serial data is being received and transferred to a buffer before the example code is executed.

```

UM7_packet new_packet;
char FW_revision[5];

// Call the parse_serial_data function to handle the incoming serial data. The serial data should
// be placed in 'rx_data' and the length in 'rx_data_length' before this function is called.
if( !parse_serial_data( rx_data, rx_data_length, &new_packet )
{
    // We got a good packet! Check to see if it is the firmware revision
    if( packet.Address == 0xAA )
    {
        // Extract the firmware revision
        FW_revision[0] = packet.data[0];
        FW_revision[1] = packet.data[1];
        FW_revision[2] = packet.data[2];
        FW_revision[3] = packet.data[3];
        FW_revision[4] = '\0'; // Null-terminate the FW revision so we can use it like a string

        // Print the firmware revision to the terminal (or do whatever else you want...)
        printf("Got the firmware revision: %s\r\n", FW_revision);
    }
    // TODO: Check to see if any of the other packets that we care about have been found.
    // If so, do stuff with them.
}

```

Note that it is not always sufficient to simply check the address of the data register that you want to read. In almost all cases, data automatically transmitted by the UM7 is sent in batch operations to improve efficiency. For example, when processed rate gyro is transmitted, it is sent in one batch packet containing registers 97 (gyro x), 98 (gyro y), 99 (gyro z), and 100 (gyro time). Thus, the address of the packet is 97, but it is a batch packet with batch length 4.

PROTOCOLO BAR30 SENSOR DE PRESIÓN



MS5803-14BA Miniature 14 bar Module



- High resolution module, 0.2 mbar
- Fast conversion down to 1 ms
- Low power, 1 μ A (standby < 0.15 μ A)
- Integrated digital pressure sensor (24 bit $\Delta\Sigma$ ADC)
- Supply voltage 1.8 to 3.6 V
- Operating range: 0 to 14 bar, -40 to +85 °C
- I²C and SPI interface (Mode 0,3)
- No external components (Internal oscillator)
- Excellent long term stability
- Hermetically sealable for outdoor devices

DESCRIPTION

The MS5803-14BA is a new generation of high resolution pressure sensors with SPI and I2C bus interface. It is optimized for depth measurement systems with a water depth resolution of 1cm and below. The sensor module includes a high linear pressure sensor and an ultra low power 24 bit $\Delta\Sigma$ ADC with internal factory calibrated coefficients. It provides a precise digital 24 Bit pressure and temperature value and different operation modes that allow the user to optimize for conversion speed and current consumption. A high resolution temperature output allows the implementation of a depth measurement systems and thermometer function without any additional sensor. The MS5803-14BA can be interfaced to any microcontroller. The communication protocol is simple, without the need to programming internal registers in the device. The gel protection and antimagnetic stainless steel cap protects against 30 bar overpressure water resistant. This new sensor module generation is based on leading MEMS technology and latest benefits from the Intersema's proven experience and know-how in high volume manufacturing of pressure modules have been widely used for over a decade. This sensing principle employed leads to very low hysteresis and high stability of both pressure and temperature signal.

FEATURES

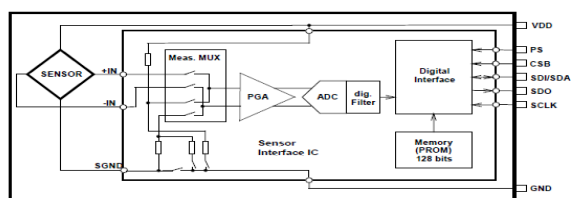
FIELD OF APPLICATION

- Mobile water depth measurements systems
- Diving computers
- Adventure or multi-mode watches

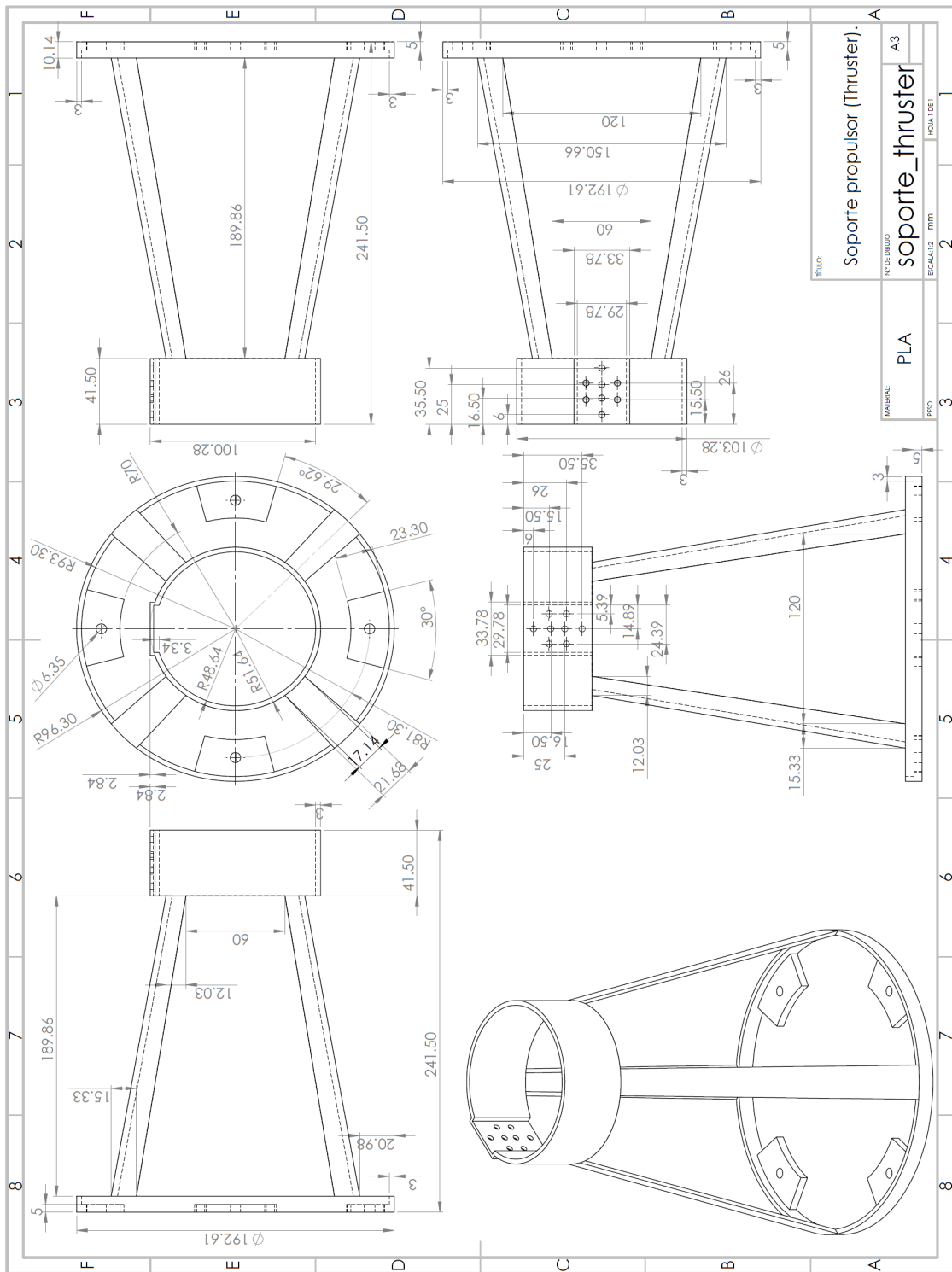
TECHNICAL DATA

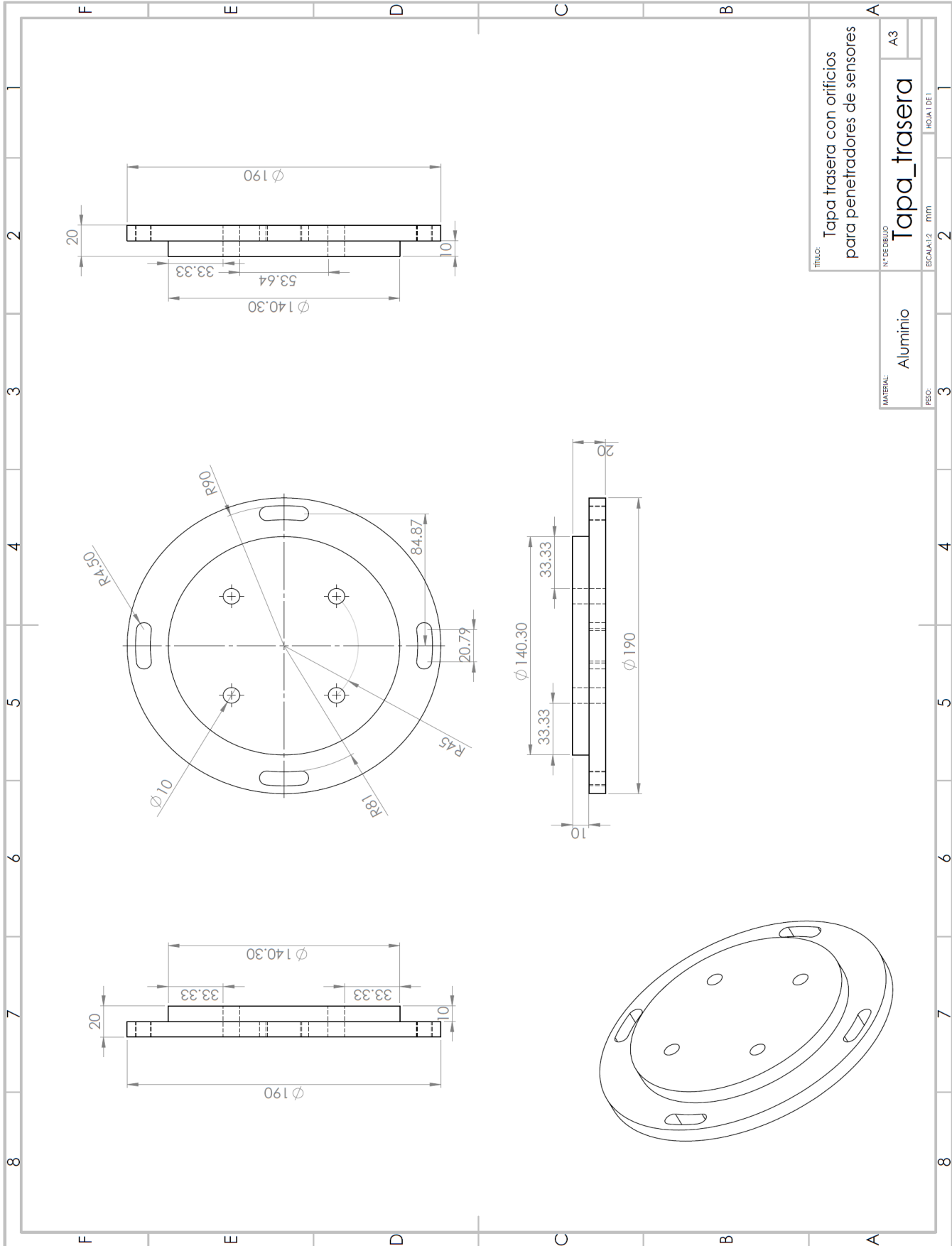
Sensor Performances (V _{DD} = 3 V)				
Pressure	Min	Typ	Max	Unit
Range	0		14	bar
ADC	24			bit
Resolution (1)	1 / 0.6 / 0.4 / 0.3 / 0.2			mbar
Accuracy 0°C to +40°C, 0 to 6 bar (2)	-20		+20	mbar
Accuracy -40°C to + 85°C 0 to 6 bar (2)	-40		+40	mbar
Response time	0.5 / 1.1 / 2.1 / 4.1 / 8.22			ms
Long term stability		-20		mbar/yr
Temperature	Min	Typ	Max	Unit
Range	-40		+85	°C
Resolution	<0.01			°C
Accuracy	-0.8		+0.8	°C
Notes: (1) Oversampling Ratio: 256 / 512 / 1024 / 2048 / 4096 (2) With autozero at one pressure point				

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PLANOS MECÁNICOS





TITULO: Tapa trasera con orificios para penetradores de sensores

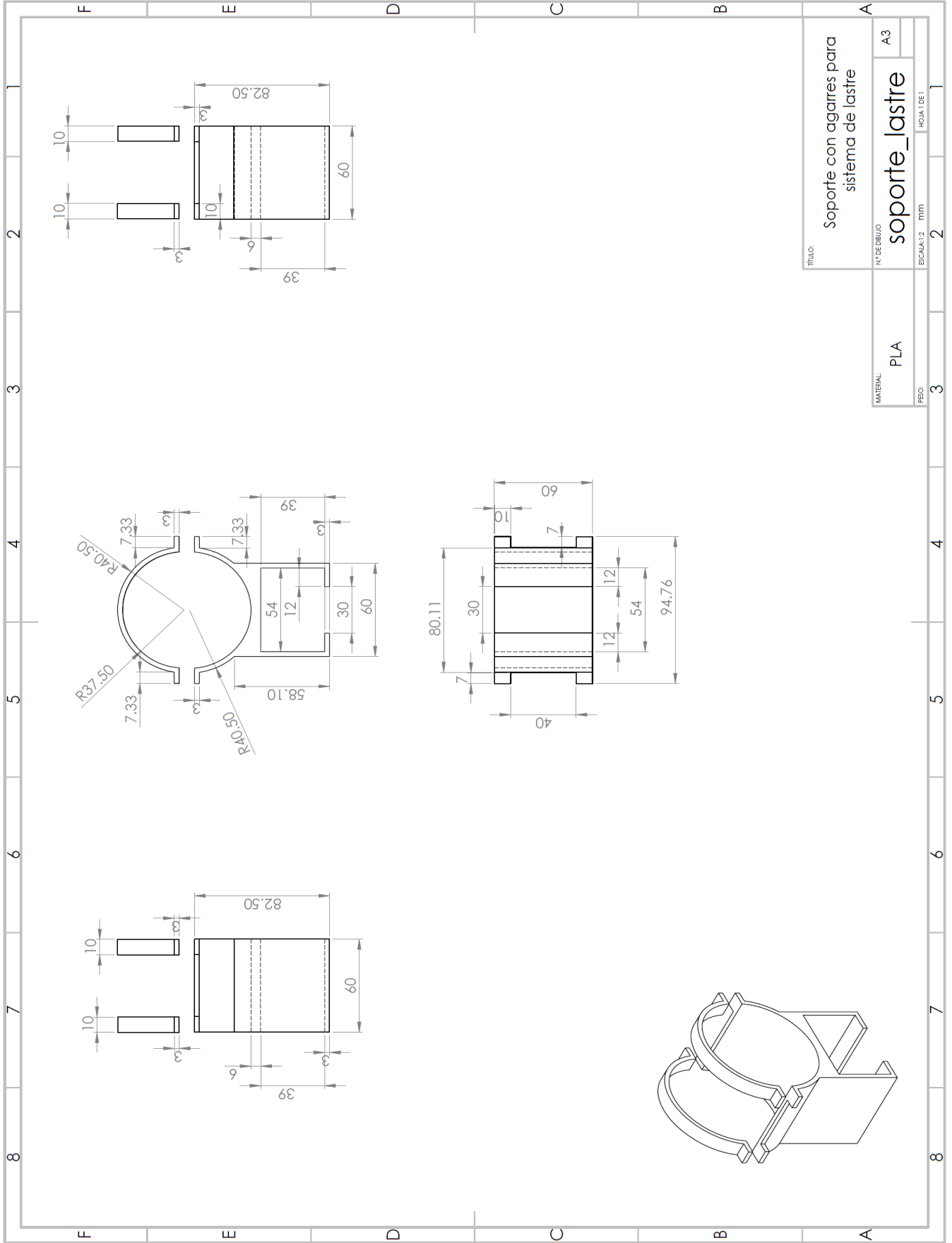
Nº DE DISEÑO: A3

ESCALA: 1:2 mm

HOJA: 1 DE 1

MATERIAL: Aluminio

RESO: 3



TÍTULO: Soporte con agarres para sistema de lastre

Nº DE DIBUJO: soporte_lastre

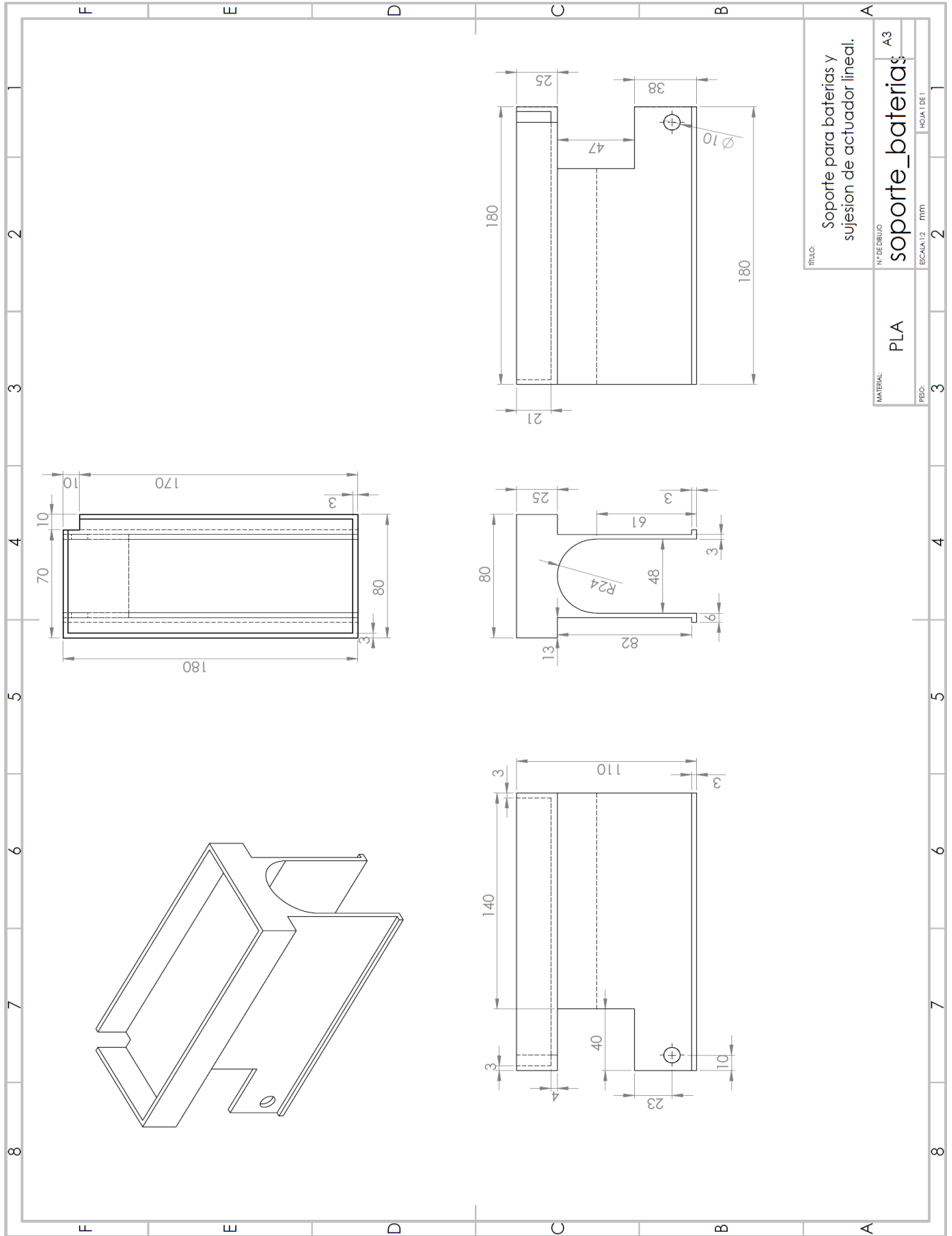
ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1

MATERIAL: PLA

FECHA: 2

HOJA 1 DE 1



TÍTULO: Soporte para baterías y sujeción de actuador lineal.

MATERIAL:	PLA						
Nº DE DIBUJO:	soporte_baterías	A3					
ESCALA: 1/2	mm						
FOLIO: 1 DE 1							